

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO  
Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Modelos para Produção Distribuída

Manuel João Queirós de Aguiar

Licenciado em Engenharia Electrotécnica pela Faculdade de Engenharia da  
Universidade do Porto

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de mestre  
em  
Engenharia Electrotécnica e de Computadores  
(Área de Energia)

Dissertação realizada sob a supervisão de  
Professora Doutora Maria Teresa Ponce de Leão,  
do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores  
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## Resumo

Esta tese tem como objectivo desenvolver uma ferramenta com vista à modelização de sistemas eólicos e solares fotovoltaicos, através de sistemas de inferência difusa, incluindo assim a incerteza inerente a este tipo de produção de energia. A estrutura desta tese encontra-se dividida em oito capítulos. No capítulo 1 faz-se a introdução à tese, com referência aos objectivos gerais e descrevendo-se de uma forma resumida os objectivos de cada capítulo. No Capítulo 2 é efectuado o enquadramento da situação das renováveis em Portugal e na União Europeia com vista a justificar as motivações da tese. No Capítulo 3 efectua-se um levantamento do Estado da Arte relativamente à tecnologia de um conjunto de fontes de energia renovável, bem como um estudo da modelização dos recursos naturais e da produção em sistemas eólicos e fotovoltaicos, com o objectivo de identificar factores de influência e fontes de incerteza. No Capítulo 4 é descrito de uma forma sucinta princípios básicos relativos conjuntos difusos, enquanto que no Capítulo 5 descrevem-se as estruturas de sistemas de inferência difusa. No Capítulo 6 descreve-se a metodologia seguida no desenvolvimento dos modelos de inferência difusa, justificando-se as opções assumidas. O Capítulo 7 serve para ilustrar a aplicação dos modelos desenvolvidos a dois casos de estudo, que consistem na avaliação da viabilidade económica de centrais fotovoltaicas e eólicas. Por fim, no Capítulo 8 apresentam-se as conclusões e comentários finais.

## Abstract

This thesis has as objective the modelization of wind and solar photovoltaic systems, through fuzzy inference systems, considering the uncertainty inherent to this type of energy production. The structure of this thesis is divided in eight chapters. In chapter 1 is introduced the thesis, referring it's objectives and describing in a short form the contents of each chapter. In the second chapter is presented the framework relatively to the use of renewable energies in Portugal and European Union, and justified the motivations for this thesis. In chapter 3 is described the State of the Art relatively to the technology of some renewable energies, as well the modelization of natural resources and production of wind and solar photovoltaic systems, with the objective of identify influence factors and sources of uncertainty. In chapter 4 are introduced the basic

principles about fuzzy sets, and in chapter 5 is described the structures of fuzzy inference systems. In chapter 6 describes the methodology used to define the fuzzy inference models, justifying the assumed options. Chapter 7 is used to illustrate the application of the models to two case studies that consist in the economic viability evaluation of a wind and a solar photovoltaic system. Finally, in chapter 8 it's presented the conclusion and final remarks.

## **Agradecimentos**

Agradeço à Prof. Teresa Ponce de Leão a sua orientação, apoio e incentivo ao longo do trabalho desenvolvido nesta tese e sem o qual não teria sido possível a sua conclusão.

Agradeço aos meus colegas e amigos do INESC Porto o seu apoio e o interesse demonstrados.

Agradeço ao INESC Porto, e em particular ao prof. Manuel Matos e prof. Peças Lopes como responsáveis pela Unidade de Sistemas de Energia, as excelentes condições de trabalho que me proporcionaram para a execução desta tese.

Finalmente, agradeço à minha família, especialmente aos meus pais e minha irmã, o apoio e paciência que sempre demonstraram, nunca me deixando desanimar.

## Índice

<b>Resumo.....</b>	<b>2</b>
<b>Agradecimentos.....</b>	<b>4</b>
<b>Lista de Siglas.....</b>	<b>11</b>
<b>1 Introdução .....</b>	<b>13</b>
<b>2 Enquadramento.....</b>	<b>15</b>
2.1 Caracterização da situação em Portugal.....	15
2.2 Caracterização da situação na Europa.....	21
2.3 Conclusões .....	23
<b>3 Estado da arte.....</b>	<b>24</b>
3.1 Eólica – Principio de funcionamento .....	24
3.2 Principais componentes e a sua descrição.....	25
3.2.1 Rotor.....	26
3.2.2 Cabina.....	27
3.2.3 Caixa de engrenagens.....	27
3.2.4 Geradores .....	28
3.2.5 Sistema de yaw (orientação direccional).....	29
3.2.6 Torre .....	30
3.2.7 Controlo da potência produzida .....	30
3.3 Modelização .....	32
3.4 Solar Fotovoltaico e Térmico – Principio de Funcionamento.....	43
3.5 Principio de funcionamento de um sistema solar fotovoltaico .....	44
3.5.1 Células Fotovoltaicas .....	44
3.5.2 Baterias.....	47
3.5.3 Inversores .....	48
3.5.4 Regulador de carga.....	48
3.6 Principio de funcionamento de um sistema solar térmico.....	50

3.6.1	Colector plano .....	51
3.6.2	Colectores concentradores.....	51
3.6.3	CPC ou colectores concentradores parabólicos .....	52
3.6.4	Colectores de tubo de vácuo.....	53
3.6.5	Tipos de sistemas solares térmicos.....	53
3.6.6	Principais aplicações: .....	54
3.7	Modelização da Energia Solar Fotovoltaica.....	55
3.8	Biomassa .....	75
3.8.1	Tecnologias .....	77
3.8.2	Combustão directa.....	77
3.8.3	Gasificação .....	78
3.8.4	Pirólise.....	79
3.9	Conclusões .....	79
<b>4</b>	<b>Fundamentos de Sistemas Difusos.....</b>	<b>83</b>
4.1	Conceitos básicos .....	83
4.2	Teoria dos conjuntos difusos.....	85
4.3	Propriedades dos conjuntos difusos .....	85
4.4	Operações básicas com conjuntos difusos .....	87
4.5	Propriedades dos conjuntos difusos .....	87
4.6	Principio da extensão .....	88
4.7	Forma dos conjuntos difusos.....	88
4.8	Normas Triangulares e Co-normas Triangulares .....	90
4.9	Lógica difusa .....	92
4.9.1	Regras difusas .....	92
4.9.2	Raciocínio aproximado .....	93
4.9.3	Variável Linguística .....	95

4.10	Conclusões .....	97
<b>5</b>	<b>Estrutura e Projecto de Sistemas Difusos.....</b>	<b>98</b>
5.1	Fuzzificação .....	99
5.2	Base de dados .....	100
5.3	Base de regras.....	101
5.4	Máquina de inferência difusa .....	102
5.4.1	Inferência difusa baseada na avaliação individual de regras.....	103
5.5	Desfuzzificação .....	107
5.6	Conclusões .....	110
<b>6</b>	<b>Modelização dos sistemas de inferência difusa .....</b>	<b>111</b>
6.1	Informação recolhida.....	111
6.2	Modelo Eólico .....	112
6.2.1	Variáveis de entrada e saída .....	114
6.2.2	Fuzzificação das variáveis de entrada e saída .....	115
6.2.3	Definição de Regras .....	121
6.2.4	Desfuzzificação .....	124
6.2.5	Resultados .....	126
6.3	Modelo Solar Fotovoltaico.....	127
	Factor de Performance .....	128
6.3.1	Fuzzificação das variáveis de entrada e saída .....	129
6.3.2	Definição das regras .....	133
6.3.3	Desfuzzificação .....	135
6.3.4	Resultados .....	135
6.4	Implementação do Modelo.....	136
6.5	Conclusões .....	138
<b>7</b>	<b>Casos de Estudo.....</b>	<b>140</b>

7.1	Instalação Fotovoltaica.....	140
7.1.1	Custos de Investimento .....	141
7.1.2	Estimativa da produção mensal de energia eléctrica.....	142
7.1.3	Cálculo da remuneração a aplicar .....	142
7.1.4	Análise à viabilidade do projecto .....	143
7.1.5	Análise de Sensibilidade .....	143
7.2	Instalação Eólica .....	144
7.2.1	Custos de Investimento .....	145
7.2.2	Estimativa da produção mensal de energia eléctrica.....	145
7.2.3	Cálculo da remuneração a aplicar .....	146
7.2.4	Análise à viabilidade do projecto .....	147
7.2.5	Análise de Sensibilidade .....	147
7.2.6	Parque off-shore .....	149
7.3	Conclusões .....	151
<b>8</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>153</b>
	<b>Referências.....</b>	<b>157</b>



## Lista de Figuras

Figura 2-1 - Consumo Final de Energia em Portugal - 2001 .....	15
Figura 3-1 Turbina Eólica .....	25
Figura 3-2 - Diâmetro do rotor em função da potência da turbina.....	26
Figura 3-3 - Variação da curva I-V com a temperatura .....	74
Figura 4-1 - Intersecção e Reunião de dois conjuntos difusos.....	88
Figura 4-2 - Qualificadores da regularidade de caudais.....	96
Figura 4-3 - Aplicação da variável linguística .....	97
Figura 5-1 - Inferência difusa através de uma máquina MAX - DOT .....	105
Figura 5-2 - Inferência difusa através de uma máquina MAX - MIN.....	106
Figura 6-1– Distribuição de Weibull.....	113
Figura 6-2 - Representação difusa da velocidade média do vento .....	116
Figura 6-3 - Representação difusa do Fluxo de Potência.....	117
Figura 6-4 - Representação difusa de NEP .....	118
Figura 6-5 - Representação difusa da área .....	119
Figura 6-6 - Exemplo de um sistema de inferência difusa para a obtenção de $C_1$ .....	119
Figura 6-7 - Exemplo de um sistema de inferência difusa para obtenção de $C_2$ .....	120
Figura 6-8 - Representação difusa da Energia produzida mensalmente .....	121
Figura 6-9 - Relação entre a velocidade média do vento e NEP .....	122
Figura 6-10 - Relação entre a velocidade média do vento e o Fluxo de Potência .....	123
Figura 6-11 – Desfuzzificação com o método Média dos Máximos.....	125
Figura 6-12 – Desfuzzificação com o método Menor dos Máximos .....	125
Figura 6-13 - Variação da Radiação Solar Global .....	130
Figura 6-14 - Representação fuzzy da Radiação Global Mensal .....	130
Figura 6-15 - Representação fuzzy da Latitude .....	131
Figura 6-16 - Representação fuzzy da Área .....	132
Figura 6-17 - Representação difusa do Rendimento nas Condições Standard.....	132
Figura 6-18 - Representação difusa da Energia Produzida Mensalmente.....	133
Figura 6-19 - Evolução anual da Radiação Global .....	134
Figura 7-1 - Variação anual da radiação solar global.....	141
Figura 7-2 - Evolução do VAL e TIR com a Radiação Global.....	144

## Lista de Tabelas

Tabela 2-1 - Evolução da potência instalada de várias formas de energia renovável .....	16
Tabela 2-3 - Percentagem de energia renovável no consumo bruto de electricidade .....	22
Tabela 3-1 - Consumo previsto de combustíveis em Portugal (Milhares de Litros).....	76
Tabela 4-1 - Operações com conjuntos difusos .....	87
Tabela 4-3 - Outros operadores t-norma e s-norma .....	91
Tabela 6-1 - Energia produzida para diferentes áreas .....	126
Tabela 6-3 - Energia produzida para diferentes áreas .....	127
Tabela 6-5 - Valores típicos do Factor de Performance.....	128
Tabela 6-7 - Exemplo de incerteza na Radiação Global .....	136
Tabela 7-1 - Custos associados a centrais fotovoltaicas .....	142
Tabela 7-3 - Estimativa da produção de energia .....	142
Tabela 7-4 - Parcelas e valor total da remuneração da central fotovoltaica.....	143
Tabela 7-6 - Valores referentes à análise económica da central fotovoltaica .....	143
Tabela 7-8 - Valores referentes à análise de sensibilidade da central fotovoltaica.....	144
Tabela 7-10 - Estimativa da produção do parque eólico .....	146
Tabela 7-11 - Parcelas e valor total da remuneração do parque eólico.....	147
Tabela 7-13 - Valores referentes à análise económica do parque eólico .....	147
Tabela 7-15 - Valores referentes à análise de sensibilidade do parque eólico .....	148
Tabela 7-17 - Valores referentes à análise de sensibilidade do parque eólico .....	148
Tabela 7-19 - Estimativa da produção para um parque eólico off-shore .....	150
Tabela 7-21 - Viabilidade económica de um parque off-shore .....	150

## Lista de Siglas

AE – Erro Absoluto

AR – Auto Regressiva

AIE – Agência Internacional de Energia

ARIMA – Autoregressive Integrated Moving Average

ARMA – Autoregressive Moving Average

AVG – Média diária mensal

CIA – Critério de Informação Akaike

COM – Dados meteorológicos comprimidos

DGGE – Direcção Geral de Geologia e Energia

EAU – Energia Anual Utilizada

EED – Energia Esperada de Descarga da bateria

EEP – Probabilidade da Energia Esperada

EENS – Energia Esperada Não Fornecida

EER – Energia Esperada de Carga

EIR – Índice de fiabilidade da energia

ENDS – Estratégia Nacional de Desenvolvimento Sustentável

ESRA – European Solar Radiation Atlas

FC – Factor de Capacidade

FP – Factor de Performance

Fpot – Fluxo de Potência

GEN – Sequência temporal artificial aleatória anual

INETI – Instituto de Engenharia e Tecnologia Industrial

LDC – Curva de duração de carga

LTD – Dados de longo prazo

MA – Média Móvel

MAPE – Medida de Apoio ao Aproveitamento do Potencial Energético e Racionalização de Consumos

MV – Valores medidos

MMV – Média dos valores medidos

MSE – Mean Square Error

MTTP: Maximum Power Point Tracking

MTTR – Mean Time to Repair

NEP – Número de horas equivalentes à produção nominal

PNAC – Plano Nacional Alterações Climáticas

RE – Erro Relativo

RG – Radiação solar global

SODA – Solar Database

TMY – Ano Meteorológico Típico

TRY – Ano teste de referência

TIR – Taxa Interna de Rentabilidade

VAL – Valor Actual Líquido

UE – União Europeia

$\eta_{STC}$  – Rendimento às Condições Standard

# 1 Introdução

Esta dissertação insere-se nos trabalhos do mestrado de Engenharia Electrotécnica e de Computadores – Ramo de Energia 2002/2004, da Faculdade de Engenharia do Porto e tem como título “Modelos de Produção Dispersa”, com vista à obtenção do grau de Mestre.

O objectivo principal desta tese é desenvolver modelos de avaliação da produção de energia tendo em conta a incerteza existente nas variáveis, associadas à tecnologia e ao recurso, que têm influência no potencial disponível. O trabalho aprofunda esta análise para a produção eólica e solar fotovoltaica, no entanto, apresenta uma base para futuros desenvolvimentos considerando outras fontes primárias. Para tal, desenvolveram-se modelos específicos recorrendo a conjuntos difusos de modo, a, caso a caso, reflectirem a incerteza associada a cada um das situações analisadas. A esta incerteza a modelizar entrará em conta com variáveis quantitativas mas também estará associada aspectos como o julgamento humano, através da modelização de opiniões de peritos. A ferramenta base para a implementação dos modelos foi o módulo de inferência difusa do Matlab.

A tese encontra-se estruturada em oito capítulos. Neste capítulo apresentam-se os objectivos que se pretendem atingir e a estrutura da tese.

No Capítulo 2 é efectuado um enquadramento da utilização das energias renováveis em Portugal e Europa.

No Capítulo 3 é efectuado um levantamento do estado do arte relativamente à tecnologia dos sistemas eólico, solar fotovoltaico e solar térmico, bem como da biomassa. Serão apresentados os princípios de funcionamento de cada um dos sistemas, bem como uma descrição dos componentes principais necessários ao seu funcionamento. É apresentado também o estado da arte relativamente à modelização dos sistemas eólico e solar fotovoltaico sendo identificadas as variáveis com mais influência no desempenho destes sistemas que obviamente terão impacto nos modelos a desenvolver.

No Capítulo 4 apresentam-se alguns conceitos da teoria dos conjuntos difusos necessários à compreensão básica da lógica e inferência difusa. É apresentada a sua definição, propriedades e operações. Estes conceitos serão necessários à compreensão da modelização a efectuar, baseada nos conjuntos difusos para acomodar a incerteza de cada uma das variáveis intervenientes nos modelos.

No Capítulo 5 são expostos os conceitos base de sistemas de inferência difusa, no que diz respeito aos seus componentes e respectivo papel. São abordados aspectos relativos à fuzzificação e desfuzzificação das variáveis linguísticas associadas às variáveis de entrada e saída, definição e composição das regras.

No Capítulo 6 são apresentados os modelos desenvolvidos para os sistemas eólico e solar fotovoltaico. São justificados os pressupostos assumidos para a escolha das variáveis de entrada e da sua consequente fuzzificação e definição das variáveis linguísticas. O mesmo procedimento é efectuado relativamente às variáveis de saída, sendo depois justificado o método de desfuzzificação de modo a obter-se um número crespo final. Serão também justificadas as regras definidas para cada modelo e eventuais simplificações consideradas. No final será realizado um exemplo de aplicação para cada um dos modelos desenvolvidos, bem como uma explicação sucinta da sua implementação recorrendo ao sistema de inferência difusa disponível no MATLAB.

O Capítulo 7, tem como objectivo ilustrar a aplicação dos modelos desenvolvidos a dois casos de estudo, que passará pela avaliação do potencial disponível e posterior análise à viabilidade económica de um empreendimentos eólicos e um outro solar fotovoltaico. Os modelos serão utilizados para determinar a produção mensal no período de investimento considerado. Estes valores serão depois usados para calcular a remuneração mensal e assim proceder à determinação da viabilização ou não de cada investimento.

Finalmente, no Capítulo 8 apresentam-se as conclusões e comentários finais ao trabalho desenvolvido nesta tese.

## 2 Enquadramento

A presente dependência energética de Portugal face ao exterior, nomeadamente ao petróleo e mais recentemente ao gás natural, são bons motivos para mudanças no nosso paradigma de consumo. Como se pode verificar na Figura 2-1, o consumo de petróleo e gás natural representou em 2001 cerca de 2/3 do consumo final total de energia, enquanto que as renováveis não passaram de 9% [1]. De facto, esta dependência coloca Portugal numa situação fragilizada, já que a factura energética aumenta, com custos evidentes para a sociedade. Outro factor que deverá impulsionar ainda mais o desenvolvimento das energias renováveis é o Protocolo de Quioto. De facto, a assinatura e o consequente compromisso assumido por Portugal, em diminuir o nível de emissões poluentes, obriga-nos a olhar para as energias renováveis como uma das principais alternativas ao nosso alcance para garantir o cumprimento das metas estabelecidas.

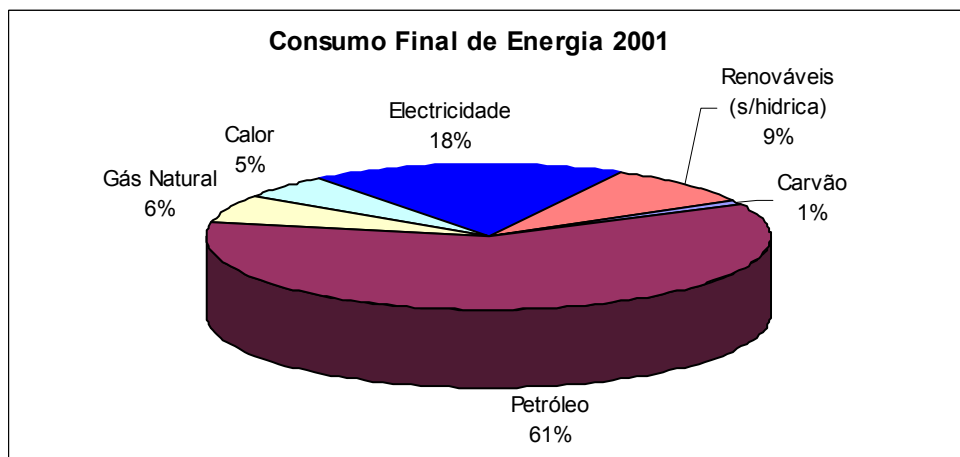


Figura 2-1 - Consumo Final de Energia em Portugal - 2001

Torna-se assim, cada vez mais premente que as energias renováveis assumam um papel mais relevante na correspondente parcela de produção.

### 2.1 Caracterização da situação em Portugal

Nos últimos anos tem-se assistido, em Portugal, a um crescimento sustentado de várias formas de energia renovável [2], tal como se pode constatar na Tabela 2-1 verifica-se que as formas de produção que apresentam um maior gradiente positivo são a eólica e solar fotovoltaico. Em relação à eólica acrescenta-se que em Dezembro de 2004 se encontravam instalados cerca de 550 MW e cerca de 3150 MW nos pontos de ligação já atribuídos. Verifica-se também, que a energia solar fotovoltaica apresenta um crescimento inferior, facto que se deve aos elevados custos de investimento neste tipo de produção. No entanto, encontra-se neste momento em construção, na região de Moura, aquela que vai ser a maior central fotovoltaica do mundo, estando licenciada a ligação de uma potência instalada de 64 MVA. A geotérmica é a única que se mantém constante ao longo dos últimos anos.

**Tabela 2-1- Evolução da potência instalada de várias formas de energia renovável**

Fonte	Potência Instalada (MW)					
	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Mini-hídrica	245	247	257	267	281	293
Biomassa	351	351	441	441	441	478
Eólica	29.16	53	57	83	125	190
Geotérmica	8.8	18	18	18	18	18
Fotovoltaica	0.53	0.65	0.93	1.17	1.34	1.51
<b>Total</b>	<b>634.49</b>	<b>669.65</b>	<b>773.93</b>	<b>810.17</b>	<b>866.34</b>	<b>980.51</b>

Vários têm sido os incentivos que surgiram ao longo dos anos, de forma a incrementar a utilização das energias renováveis. Actualmente, o programa que se encontra activo é o PRIME através do MAPE (Medida de Apoio ao Aproveitamento do Potencial Energético e Racionalização de Consumos) [3], em que um dos exemplos é o recente apoio a projectos de centrais eólicas, envolvendo a assinatura de 20 contratos, num valor total de 273 M€, para uma potência instalada total de 244.45 MW a que correspondem 129 geradores. Este programa tem também o objectivo de promover centrais de outros tipos de energia renovável como a energia solar, nas suas componentes fotovoltaica e térmica (neste caso, encontra-se o Programa Nacional de Água Quente Solar).

Recentemente foi definido através da Resolução de Conselho de Ministros nº63/2003 [4], a Política Energética Nacional que assenta em três eixos principais:

- Assegurar a segurança de abastecimento;
- Fomentar o desenvolvimento sustentável;
- Promover a competitividade nacional.



Foi assim traçado um conjunto alargado de objectivos de política energética, dos quais se destacam os seguintes:

- Reestruturação do Sector Energético;
- Liberalização dos mercados (combustíveis, electricidade e gás);
- Segurança do aprovisionamento e do abastecimento;
- Diversificação das fontes e aproveitamentos dos recursos endógenos;
- Melhoria da Qualidade de Serviço;
- Redução da intensidade energética do produto e da factura energética;
- Minimização do impacte ambiental.

Como é conhecido, Portugal assumiu o compromisso europeu de que, em 2010, pelo menos 39% do consumo bruto nacional de electricidade provirá de fontes de energia renováveis [5].

As energias renováveis, são hoje consideradas como uma área de negócio atractiva, capaz de dar resposta aos três eixos estratégicos da Política Energética Nacional, e isto, pelas seguintes razões:

- São a única fonte endógena de energia disponível em Portugal;
- Têm um carácter eminentemente descentralizado e podem contribuir para o desenvolvimento local;
- Têm um reconhecido benefício ambiental, nomeadamente no importante contributo para esforço de redução de emissões de Gases de Efeito de Estufa e cumprimento dos compromissos assumidos em torno do Protocolo de Quioto.

No entanto é necessário relembrar que Portugal já dispõe hoje de uma importante contribuição de fontes endógenas na produção de energia. De facto, o valor bastante significativo de potência instalada hídrica (aproximadamente 4.150 MW), aliado a alguma contribuição de outras formas de energia renovável, já é responsável pela produção de cerca de 35% do consumo nacional em ano médio.

No entanto, atendendo ao forte crescimento da procura (cerca de 4,4% ao ano), para cumprir o objectivo dos 39% de energias renováveis, será necessário aumentar a capacidade

instalada a partir de fontes de energia renovável em praticamente 4.800 MW até 2010, passando esta para um total de 9.600 MW, ou seja, cerca de 44% da estimativa do total de consumo nacional de então.

Este acréscimo será repartido pelas diferentes fontes renováveis alternativas através de:

- Aumento muito significativo na produção de energia eólica, passando dos 290 MW actuais para 3.750 MW em 2010;
- Construção e exploração de novas centrais de produção de grande hídrica num total 800 MW (cerca de 20% da potência actual), aumentando a capacidade instalada deste tipo de fonte de energia para o valor de cerca de 4.950 MW;
- Introdução de 550 MW instalados de outras fontes de energia renovável (Biomassa, Biogás, Resíduos sólidos urbanos, Ondas, Solar fotovoltaico).

Paralelamente aos apoios financeiros no âmbito do PRIME que acima foram referidos, é de realçar:

- A garantia de escoamento da energia produzida por fontes de energia renovável, actualmente assegurada através da obrigatoriedade de compra pela REN aos produtores, mas possibilitando no futuro, e sempre que tal seja tecnologicamente viável, o livre acesso destes ao mercado;
- A definição de uma tarifa garantida e subsidiada face ao preço do mercado grossista de electricidade, que no caso concreto da energia eólica é actualmente superior, em cerca de 135%, ao valor médio deste último;
- A realização de investimentos de rede (cerca de 150 milhões de € já realizados e/ou previstos), complementares aos realizados pelos promotores, para escoamento da energia a partir dos pontos de produção;
- A simplificação do processo administrativo no licenciamento dos projectos, nomeadamente através da aprovação de um Despacho Conjunto dos Senhores Ministros da Economia e das Cidades, Ordenamento do Território e Ambiente, visando a redução de prazos para aprovação em mais de 6 meses e definição de descritores estandardizados a utilizar pelos Serviços Administrativos com vista a objectivação do processo de licenciamento.

Por fim é necessário relembrar a forte contribuição que todos estes objectivos têm nas medidas de minimização do impacte ambiental, nomeadamente nas definidas no Plano Nacional de Alterações Climáticas (PNAC) [6].

Num total de potencial de redução de 14,6 Milhões ton. de CO<sub>2</sub>eq previsto nas medidas estabelecidas quer no Cenário de Referência, quer no Bloco Adicional do PNAC, a promoção de fontes de energia renováveis corresponde a cerca de 5 Milhões, ou seja aproximadamente 34%.

Outro factor importante a considerar, no desenvolvimento das energias renováveis em Portugal, prende-se com a Estratégia Nacional de Desenvolvimento Sustentável [7]. Segundo a definição estabilizada, trata-se do desenvolvimento que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer as possibilidades das gerações futuras satisfazerem as suas próprias necessidades, através de práticas que garantam a preservação do ambiente, o bem estar social identificando oportunidades de desenvolvimento económico.

De facto esta estratégia insere-se dos compromissos internacionais assumidos pelo nosso país no âmbito da Agenda 21, acordada na Conferência das Nações Unidas sobre Ambiente e Desenvolvimento, realizada no Rio de Janeiro em 1992, sendo mais tarde reafirmado na 19ª Sessão Especial da Assembleia Geral das Nações Unidas de 1997, tendo os Estados-Membros da União Europeia apresentado as suas estratégias nacionais no Conselho Europeu de Sevilha (Junho de 2002), no quadro de preparação da Cimeira sobre Desenvolvimento Sustentável que ocorreu em Joanesburgo (Agosto-Setembro de 2002).

Esta estratégia apresenta quatro domínios estratégicos referentes a:

- garantir o desenvolvimento equilibrado do território;
- melhorar a qualidade do ambiente;
- produção e consumo sustentáveis;
- uma sociedade solidária e do conhecimento.

Os domínios estratégicos apresentados introduzem várias linhas de orientação que definem as políticas a assumir no domínio respectivo.

Deste modo, na produção e consumo sustentáveis, uma das linhas de orientação refere-se ao sector de energia. Aqui, pretende-se promover a racionalização e aumento da eficiência energética, reduzindo a intensidade energética do PIB, e incrementar a utilização de recursos energéticos endógenos, no respeito pelos recursos naturais e a biodiversidade, contribuindo

assim (conjuntamente com a continuação do incremento do uso de combustíveis mais limpos) para uma diminuição das emissões atmosféricas.

Na sequência deste documento foi publicada a Estratégia Nacional do Desenvolvimento Sustentável 2005-2015 [8] que tem como objectivos reforçar os seguintes aspectos:

- Dar maior ênfase às opções de política que possam contribuir para obter um crescimento económico mais rápido e sustentado;
- Dar maior ênfase à vertente social, e em especial à redução dos estrangulamentos a nível da qualificação dos recursos humanos; à definição do modo de resposta às transformações demográficas e ao que implicam na sustentabilidade dos sistemas de apoio e protecção social; e por último ao combate à exclusão social;
- Organizar a vertente ambiental da ENDS de forma mais sintética, concentrando atenção nas actuações que podem fazer a diferença e não procurando a exaustividade.

Está-se assim perante um esforço de integração das componentes ambiental, social e económica, para a concepção e implementação das diferentes políticas públicas, orientadas no médio e longo.

Na componente ambiental, onde de entre várias preocupações se destacam as relativas à elevada intensidade energética da economia, ou seja, a eficiência energética encontra-se muito longe do desejado; a dependência energética de Portugal em que, como já foi referido, cerca de 84% da energia consumida é importada constituindo assim uma vulnerabilidade do país face ao exterior, com evidentes custos para a balança comercial e crescimento da factura energética; e o facto de Portugal ser um país rico em energias renováveis, em que existe uma utilização elevada dos recursos hídricos para a produção de energia eléctrica, as restantes formas de energia renovável como a eólica, solar, biomassa e geotérmica ainda não são utilizadas com a intensidade desejada, apesar de nos últimos anos se ter assistido a um esforço da sua promoção e utilização.

Para alcançar os objectivos de integração das componentes ambiental, social e económica a ENDS 2005 - 2015 encontra-se definida em torno de seis objectivos. São eles:

- 1: Qualificação dos portugueses em direcção à Sociedade do Conhecimento;
- 2: Economia sustentável, competitiva e orientada para actividades do futuro;

- 3: Gestão eficiente e preventiva do ambiente e do património natural;
- 4: Organização equilibrada do território que valorize o país no espaço europeu e que proporcione qualidade de vida;
- 5: Dinâmica de coesão social e de responsabilidade individual;
- 6: Papel activo do país na cooperação global.

Para cada objectivo são definidas várias medidas para a sua concretização, destacando-se para o segundo objectivo a utilização de forma racional dos recursos naturais, aproveitando o potencial endógeno nacional e assumindo o património como um valioso recurso para o crescimento económico e para o desenvolvimento harmonioso e sustentável. Se uma pequena economia aberta quiser, além de ter um crescimento elevado, assegurar um desenvolvimento sustentável necessita de cruzar estes objectivos com a necessidade de reduzir a intensidade energética do crescimento, pela promoção da eficiência energética e pela diversificação das fontes, nomeadamente pela aposta clara nas energias renováveis. Defende também que o objectivo que Portugal assumiu perante a União Europeia, de que 39% consumo de energia em 2010 seja proveniente de fontes renováveis, seja atingido.

Fica assim destacada a importância assumida pela utilização das energias renováveis, quer a nível ambiental, económico e social. A nível ambiental porque, permite diminuir o nível emissões poluentes e assim cumprir os objectivos assumidos no âmbito do Protocolo de Quioto; a nível económico, porque permite reduzir a factura energética e assim diminuir a dependência energética face ao exterior; e a nível social, porque contribui para um incremento do bem-estar da sociedade.

## **2.2 Caracterização da situação na Europa**

Como já foi referido anteriormente, é um objectivo definido pela Comissão Europeia que 12% do consumo final de energia em 2010 seja proveniente de fontes de energia renováveis. Para tal foram definidas ao longo do tempo um conjunto de directivas e programas, que visam alcançar este objectivo.

A directiva que actualmente se encontra em vigor é a 2001/77/EC [9], que tem como objectivo a promoção da electricidade produzida a partir fontes de energia renováveis no mercado interno de electricidade. Na Tabela 2-3 são indicados os objectivos que cada um dos

países assumiram para 2010, relativamente à percentagem de energia renovável no consumo bruto de electricidade.

**Tabela 2-3- Percentagem de energia renovável no consumo bruto de electricidade**

<b>País</b>	<b>E-FER (TWh) 1997</b>	<b>E-FER 1997 %</b>	<b>E-FER 2010 %</b>
Bélgica	0,86	1,1	6,0
Dinamarca	3,21	8,7	29,0
Alemanha	24,91	4,5	12,5
Grécia	3,94	8,6	20,1
Espanha	37,15	19,9	29,4
França	66,00	15,0	21,0
Irlanda	0,84	3,6	13,2
Itália	46,46	16,0	25,0
Luxemburgo	0,14	2,1	5,7
Países Baixos	3,45	3,5	9
Áustria	39,05	70,0	78,1
Portugal	14,30	38,5	39,0
Finlândia	19,03	24,7	31,5
Suécia	72,03	49,1	60,0
Reino Unido	7,04	1,7	10

Relativamente ao programa de apoio, o que vigora actualmente é o “Programa Energia Inteligente para a Europa” [10]. O seu objectivo consiste na promoção das energias renováveis e da gestão eficiente de energia através da catalisação dos esforços locais, nacionais e regionais no espaço da União Europeia. O programa foca na remoção das barreiras administrativas e de mercado que impedem a implementação em grande escala de projectos inovadores. Este programa permitiu que os vários programas existentes fossem reorientados e agrupados num programa único e coerente. O orçamento global é de 250 milhões de euros para um período de 3 anos. Isto representa um acréscimo relativamente aos programas Altener e Save que representaram no conjunto um orçamento de 220 milhões de euros, durante o período 1993-2000.

Adicionalmente o sexto programa quadro (2002-2006) apoia a investigação no campo das energias renováveis e gestão eficiente de energia com um orçamento de 810 milhões de euros.

Numa recente comunicação efectuada pela Comissão Europeia [11], chegou-se às seguintes conclusões.

A primeira conclusão refere que o objectivo definido por cada país membro é consistente com o valor referenciado tabela anterior. Infelizmente, as políticas nacionais, medidas e objectivos alcançados, comunicados pelos diferentes países traduzem um cenário mais pessimista.

Isto, leva a uma segunda conclusão que refere, que apesar dos progressos alcançados, o objectivo definido para 2010, não será alcançado sob as actuais medidas e políticas, mesmo num cenário assente numa redução da procura de energia eléctrica, como resultado de novas medidas energeticamente mais eficientes. As actuais medidas conduzirão provavelmente a resultados que apontam para percentagens entre os 18 e 19% em 2010.

Uma terceira conclusão aponta como principal razão para que o objectivo definido não seja atingido, o fraco do crescimento da energia produzida a partir da biomassa que apresenta grandes desvios relativamente ao que inicialmente apontavam as previsões da comissão europeia. A título de comentário poder-se-á referir que talvez haja necessidade de rever a remuneração desta forma de energia. Seguramente, no caso português, o tarifário é um dos factores de constrangimento.

## **2.3 Conclusões**

Este capítulo serviu para efectuar uma caracterização da utilização das energias renováveis a nível nacional e europeu.

Relativamente a Portugal, destacaram-se os aspectos relacionados com a dependência energética do país, a Política Energética Nacional e alguns dos apoios existentes à introdução das energias renováveis, como o MAPE. Referiram-se as políticas definidas pelo PNAC e ENDS e o destaque do papel a desempenhar pelas energias renováveis na redução das emissões poluentes e seu contributo para um desenvolvimento sustentável.

Na Europa referiram-se os objectivos de integração das energias renováveis assumidos pelos vários países da UE no âmbito do Livro Branco, tendo-se chegado à conclusão que muito dificilmente os mesmos serão atingidos, apesar dos vários programas de apoio que foram surgindo.

Fica assim esclarecida a importância atribuída às energias renováveis e destacado o seu papel na estrutura de produção de energia e fundamentadas algumas das razões para o trabalho desenvolvido nesta tese, ou seja, a necessidade de considerar as energias renováveis como uma opção. No entanto, quando se lida com este tipo de fonte de energia é necessário considerar a incerteza associada à sua disponibilidade ou tecnologia e consequentemente incerteza associada à sua produção. Assim, esta tese tem como objectivo criar modelos, através de sistemas de inferência difusa, que permitam considerar estes tipos de incerteza.

### **3 Estado da arte**

Neste capítulo efectua-se uma descrição do princípio de funcionamento e descrição dos principais componentes de sistemas de produção dispersa, nomeadamente sistemas de produção eólica, solar fotovoltaica e térmica, bem como biomassa.

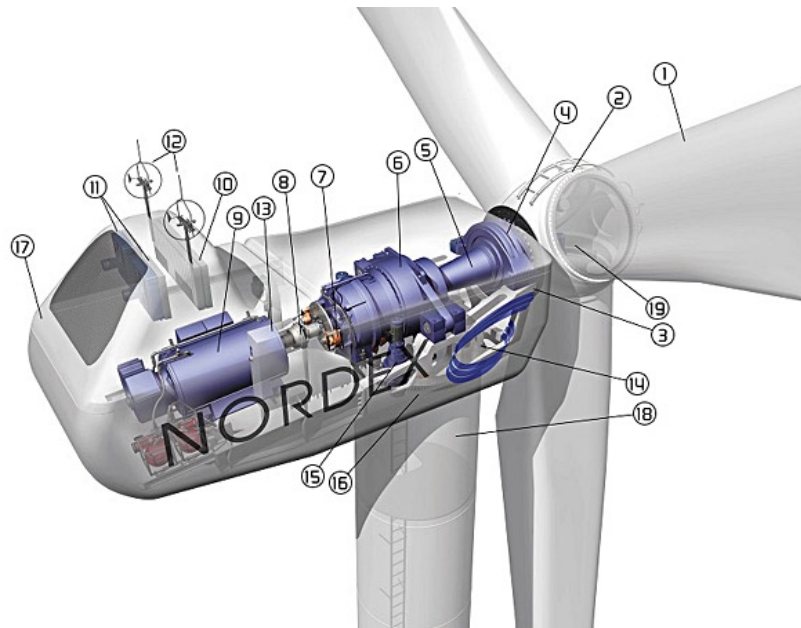
Relativamente à modelização, apenas se apresentam os aspectos relativos ao eólico e solar fotovoltaico.

#### **3.1 *Eólica – Princípio de funcionamento***

A energia eólica tem como princípio de funcionamento o aproveitamento da energia cinética do vento, que resulta da deslocação do ar das zonas de alta pressão para as zonas de baixa pressão. Esta deslocação do ar é aproveitada pelas pás da turbina para accionar um gerador de corrente eléctrica que assim produz electricidade. No entanto a instalação das turbinas eólicas somente tem interesse quando a velocidade do vento, na zona em que serão instaladas atinja a velocidade de pelo menos 3.6 m/s num regime o mais permanente e regular possível e sem grande turbulência [12].

Os componentes mecânicos fundamentais da turbina eólica são, o rotor que é o responsável pelo aproveitamento da energia cinética do vento e accionamento do gerador, a nacelle (cabina) que é o local onde estão instaladas engrenagens e os mecanismos de regulação da turbina e a torre que serve de apoio a estas duas estruturas.





**Figura 3-1 Turbina Eólica**

Legenda:

- |                          |                                   |
|--------------------------|-----------------------------------|
| 1 : Pás do rotor         | 2: Hub                            |
| 3: Frame do gerador      | 4: Engrenagem do rotor            |
| 5: Veio do rotor         | 6: Caixa de engrenagens           |
| 7: Travão                | 8: Acoplamento do gerador         |
| 9: Gerador               | 10: Radiador                      |
| 11: Ventiladores         | 12: Sistema de medição do vento   |
| 13: Sistema de controlo  | 14: Sistema hidráulico            |
| 15: Sistema de Yaw       | 16: Engrenagens do sistema de yaw |
| 17: Cobertura da nacelle | 18: Torre                         |
| 19: Sistema de pitch     |                                   |

### **3.2 Principais componentes e a sua descrição**

Como já foi referido os principais componentes de uma turbina eólica são o rotor, a cabina e a torre. Apresentamos de seguida uma breve descrição de cada um destes componentes.

### 3.2.1 Rotor

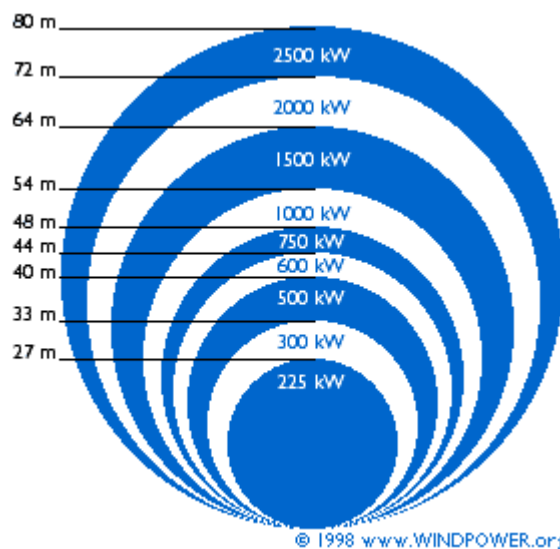
As pás do rotor influenciam a eficiência das turbinas eólicas, pelo que a sua concepção é um dos aspectos mais importantes. A evolução técnica ao nível dos materiais tem implicado nos últimos anos um crescimento da dimensão dos rotores o que significa que a potência das turbinas tem aumentado, visto que existe uma relação de proporcionalidade entre estes dois factores como se pode comprovar pela seguinte expressão [13]:

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3 = \frac{1}{2} \times \rho \times (\pi \times r^2) \times v^3 \quad (3-1)$$

em que:

- §  $\rho$  é a massa específica do ar (1.225 kg/m<sup>3</sup>);
- §  $A$  é a área de varrimento das pás (m<sup>2</sup>);
- §  $r$  é o raio das pás (m);
- §  $v$  é velocidade do vento.

Na Figura 3 podemos comprovar esta relação:



**Figura 3-2 - Diâmetro do rotor em função da potência da turbina**

Quanto à posição das pás as soluções mais comuns adoptadas passam pela colocação das pás a montante (*upwind*) ou a jusante (*downwind*) da cabina. A primeira solução em que o vento ataca as pás pela frente da torre impôs-se visto que o vento incidente não é perturbado pela torre. Já a segunda solução, em que o vento ataca as pás pela parte posterior tem sido progressivamente abandonada, porque o escoamento é perturbado pela torre antes de incidir no rotor, embora apresenta-se como vantagem o facto de permitir o auto alinhamento do rotor com o vento [14].

Quanto ao número de pás a solução mais comum consiste na utilização de três pás, em detrimento das soluções com duas ou uma pá sendo que esta solução não foi adoptada comercialmente. A solução de adoptar duas pás tem como vantagem o facto de poupar no custo de construção de uma pá e no seu peso inferior. No entanto, tem como desvantagem o facto de necessitarem de uma maior velocidade de rotação para produzirem a mesma potência, o que provoca um maior ruído e um maior impacto visual. Esta solução exige uma concepção mais complexa, porque necessita que o hub (local de fixação das turbinas) do rotor possa baloiçar, ou seja faça um ângulo com a vertical de modo a evitar os *shocks* quando as pás passam pela torre.

Relativamente aos materiais utilizados na construção das pás, os mais utilizados são os materiais sintéticos, normalmente fibras de vidro reforçadas com poliéster (GRP: *glass fibre reinforced polyester*). A utilização de fibra de carbono como material de reforço tem sido estudado, mas geralmente estas pás não são viáveis de ponto de vista económico para turbinas de grande dimensão. A madeira, madeira-epoxy ou os compostos de fibra e madeira-epoxy ainda não penetraram no mercado apesar de existirem desenvolvimentos nesta área. Relativamente ao aço e alumínio estes apresentam como principais problemas o peso e a fadiga dos materiais, pelo que só são utilizados em turbinas de pequena dimensão.

### **3.2.2 Cabina**

A cabina alberga os componentes de uma turbina eólica incluindo, entre outros, a caixa de engrenagens (quando existe), o veio e o gerador.

### **3.2.3 Caixa de engrenagens**

O binário do rotor da turbina é transmitido ao gerador através do veio, a caixa de engrenagens e veio de alta rotação. A utilização da caixa de engrenagens justifica-se pelo facto

de que se utilizássemos um gerador de 4 ou 6 pólos ligado directamente a uma rede à frequência de 50 Hz, conduziria a uma velocidade do veio da turbina extremamente elevada, a rondar as 1000 e 3000 rpm. Com um rotor de um diâmetro de 43 m isto implicaria uma velocidade do rotor da turbina superior a duas vezes a velocidade do som.

Construindo um gerador com um grande número de pólos e ligado directamente à rede obter-se-ia um gerador de 200 pólos de modo a obter uma velocidade razoável de 30 m/s, o que seria incomportável.

Relativamente à massa do rotor, esta tem de ser proporcional ao binário que tem de suportar. Assim, um gerador sem caixa de engrenagens será muito pesado e dispendioso.

Deste modo a solução passou por adoptar uma caixa de engrenagens, que tem como função converter a velocidade lenta e um momento elevado provenientes do rotor da turbina, numa velocidade elevada e um momento baixo a serem utilizados pelo gerador eléctrico. Uma caixa de engrenagens tem normalmente uma relação de transformação única entre a rotação do rotor e a do gerador. Para um gerador de 600 ou 750 kW, a relação da caixa é tipicamente de 1 para 50.

### **3.2.4 Geradores**

As turbinas poderão ser equipadas tanto com geradores síncronos como assíncronos, se bem que estes últimos sejam mais utilizados.

Existem turbinas com um gerador assíncrono podendo no entanto este ter dois escalões de potências diferentes obtidos através de (uma bobina dupla) “double wound” de 4/6 pólos, com dois enrolamentos separados. Assim, a turbina entra em funcionamento para ventos com velocidade da ordem dos 3 ou 4 m/s, sendo ligado automaticamente à rede quando o gerador/rotor atinge a velocidade de sincronização. Deste modo para velocidades até 7 m/s é o escalão de menor potência que entra em funcionamento, estando este escalão compreendido entre os 45 kW e os 250 kW. Para velocidades do vento compreendidas entre os 7 m/s e os 25 m/s é ligado o escalão de maior potência, tendo este escalão o valor da potência nominal da turbina. Se o vento ultrapassar os 25 m/s a turbina é desligada automaticamente por razões de segurança.

Existem igualmente turbinas com dois geradores assíncronos, um primário com o valor correspondente à potência nominal e outro secundário com uma potência nominal da ordem dos

200 kW. Esta solução tem como objectivo realizar o mesmo modo de operação descrito anteriormente para as turbinas com geradores de dois escalões de potências.

Os geradores síncronos, nomeadamente utilizados pela Enercon, possuem o seu veio directamente ligado ao veio do hub, pelo que dispensa a utilização de caixa de engrenagens.

Uma das razões pelas quais o gerador assíncrono é mais utilizado que o síncrono prende-se com o facto de que, o gerador assíncrono devido ao seu deslizamento permite que este varie a sua velocidade consoante as variações do momento (binário). Isto significa que existirá um menor desgaste da caixa de engrenagens. O deslizamento varia em função da resistência medida aos terminais dos enrolamentos do gerador. Assim, se a resistência aumenta, o deslizamento também aumentará, deste modo uma maneira fácil de variar o deslizamento é variando a resistência do rotor. Uma das vantagens das turbinas de velocidade variável reside no facto do controlo do *pitch* (controlar o momento de modo a não sobrecarregar a caixa de engrenagens e o gerador rodando para tal as pás da turbina) ser um processo mecânico. Isto significa que o tempo de reacção do mecanismo de *pitch* constituirá um factor muito importante na concepção da turbina. No entanto, se possuírmos um gerador de velocidade (deslizamento) variável poderemos aumentar o seu deslizamento no momento em que a turbina se aproxima da sua potência nominal. Uma estratégia de controlo muito utilizada consiste em operar o gerador a metade do seu deslizamento máximo quando a turbina está próximo da sua potência nominal. Quando ocorre uma rajada de vento, o mecanismo de controlo emite um sinal ao gerador de modo a este aumentar o seu deslizamento, permitindo assim que o rotor rode a uma velocidade superior, enquanto que o mecanismo de *pitch* roda as pás da turbina de modo a fazer face ao aumento da velocidade do vento. Assim que, o mecanismo de *pitch* finaliza a sua função, o deslizamento irá diminuir. No caso de uma diminuição súbita do vento, o processo é aplicado do modo inverso.

### **3.2.5 Sistema de yaw (orientação direccional)**

O objectivo do sistema de yaw (orientação direccional) tem como objectivo manter o rotor na perpendicular com a direcção do vento permitindo assim, um maior aproveitamento da potência produzida.

Este mecanismo é constituído por um conjunto de engrenagens e motores e é controlado por um controlador electrónico em que várias vezes por segundo verifica a posição do catavento

da turbina, sempre que esta está em funcionamento. Se a turbina estiver fora de serviço este mecanismo encontra-se travado não permitindo assim que a turbina se mova.

### 3.2.6 Torre

A torre da turbina tem como função suportar a torre e o rotor e podem ser de vários tipos. As principais são as torres tubulares em aço, as reticulares e as de betão [14].

As turbinas de maior potência utilizam normalmente as torres tubulares em aço que são construídas em blocos de 20-30 metros e depois são montadas no local da instalação. Estas torres possuem uma forma cónica de forma a permitirem uma redução do material utilizado e ao mesmo tempo aumentar a sua resistência.

As torres reticulares, que são constituídas por peças de aço soldadas, têm progressivamente caído em desuso devido principalmente a razões de ordem estética. Este tipo de torre possui como principal vantagem o seu baixo custo, já que a quantidade de material utilizado é bastante inferior ao utilizado pelas torres tubulares de aço.

Para turbinas de pequena potência utilizam-se por vezes varas suportadas por cabos. A principal vantagem reside no seu baixo peso e consequentemente baixo custo. Como desvantagens temos a dificuldade de acesso à volta da turbina e assim são menos susceptíveis de serem utilizadas em parques eólicos. Por outro lado este tipo de turbina é mais propensa a actos de vandalismo.

Por vezes encontram-se soluções que são soluções híbridas dos vários tipos referidos anteriormente.

### 3.2.7 Controlo da potência produzida

Um factor importante numa turbina eólica é controlo da potência que esta pode produzir. Isto pode ser obtido através de dois sistemas: o *pitch control* e o *stall control*. O primeiro consiste no controlo do ângulo das pás, e o segundo consiste em dar uma forma aerodinâmica à pá de modo a que quando o vento exceda uma certa velocidade esta pare [14].

No *pitch control* o sistema de controlo da turbina monitoriza a potência produzida pela turbina, várias vezes por segundo. Quando a produção se torna muito elevada, envia um sinal ao mecanismo de *pitch* de modo a este imediatamente rodar as pás de modo a que a superfície de

contacto com o vento diminua. No caso da potência produzida diminuir, o sistema de controlo envia um sinal ao mecanismo de *pitch* de modo a aumentar a superfície de contacto com o vento aumentar.

Durante a operação normal da turbina, o mecanismo de *pitch* as pás irão rodar uma fracção de grau de cada vez, e o rotor irá mover-se simultaneamente. O sistema de *pitch* é constituído normalmente por sistemas hidráulicos.

As turbinas que utilizam o sistema *stall* possuem as suas pás fixadas no *hub* com um ângulo fixo. O perfil das pás neste tipo de turbina é tal que no momento em que a velocidade do vento se torne muito elevada, é criada turbulência na face da pá que não está virada para o vento. Esta situação impede que a força de sustentação (*lifting*) das pás actue no rotor. Se olharmos com atenção ao perfil das pás deste tipo de turbinas, verifica-se que estas são ligeiramente torcidas ao longo do seu eixo longitudinal. Esta concepção tem como objectivo assegurar que as pás da turbina diminuam a sua velocidade de uma forma gradual, em vez de parar de uma forma abrupta quando a velocidade do vento atinge um valor crítico.

Uma vantagem do sistema *stall* é que se evita partes móveis no rotor e um complexo sistema de controlo. Por outro lado, o sistema *stall* representa um problema de design complexo do ponto de vista aerodinâmico já que, é necessário considerar a estrutura aerodinâmica de toda a turbina, por exemplo vibrações ao nível da estrutura.

Recentemente tem sido desenvolvido para turbinas de maiores potências (>1 MW) um mecanismo de *stall* activo. Este mecanismo tem grandes semelhanças com o mecanismo de *pitch*, já que permitem que as pás rodem. De modo a obterem um momento razoável a velocidades reduzidas, as máquinas serão programadas a rodar as suas pás, tal como se verifica no controlo *pitch* para velocidades reduzidas.

Quando a máquina atinge a sua potência nominal observar-se-á uma diferença importante relativamente ao mecanismo de *pitch*. Se o gerador ficar em sobrecarga, a turbina irá rodar as suas pás no sentido contrário a que uma turbina com *pitch* faria. Ou seja, irá aumentar o ângulo de ataque das pás do rotor de modo a que pás reduzam ainda mais a sua velocidade, desperdiçando assim a energia em excesso no vento.

Uma das vantagens deste sistema é que permite controlar a potência com uma maior precisão do que com um sistema de *stall* convencional, bem como evita que a potência nominal da turbina seja ultrapassada no início de golpes de vento. Outra vantagem consiste na possibilidade de operação da turbina na sua potência nominal de um modo praticamente

constante, no caso de velocidade elevada do vento. Uma turbina com um sistema convencional de *stall* irá diminuir a sua produção para velocidades elevadas do vento.

Este tipo de mecanismo normalmente é constituído por sistemas hidráulicos.

### 3.3 Modelização

Nesta fase, apresenta-se o estado da arte relativamente aos elementos a ter em consideração quando se efectua a instalação de parques eólicos. Nesta secção apresentar-se-á também o que actualmente se utiliza, no que se refere, à modelização do vento.

Assim, como principais elementos a ter em consideração, para efectuar estudos para determinação da viabilidade da instalação de parques eólicos destacam-se os seguintes referenciados por Kariniotakis [15]:

- descrição detalhada do local potencial para a instalação, tendo em particular atenção a orografia e obstáculos;
- descrição das turbinas a utilizar, especificando a altura do *hub*, curva de potência e curva *thrust*<sup>1</sup>;
- descrição do parque eólico, ou seja, a disposição das turbinas no parque.

Factores que de resto, são também referenciados por Jangamshetti e Rau.

A estes factores Bailey [16] acresce o mapeamento de recursos eólicos como ferramenta para a localização óptima dos parques. Para tal, são utilizados modelos atmosféricos avançados mesoescala para efectuar a previsão e mapeamento, com uma certa fiabilidade, dos recursos eólicos de um dado local. Os mapas de vento fornecem estatísticas com áreas elementares de 1 hectare, ou menos, e podem ser utilizados com outras ferramentas, como os sistemas de informação geográfica para a identificação eficaz dos locais com potencial. Outro aspecto em destaque é o da optimização do layout do parque eólico, ou seja a disposição das turbinas eólicas pela área do parque. De modo a alcançar este objectivo utilizam-se ferramentas, software, que são utilizadas para dispor de uma maneira óptima as turbinas de um parque eólico, de modo a

---

<sup>1</sup> Thrust: é a força perpendicular que o vento exerce sobre as pás da turbina



maximizar a produção de energia, minimizar o ruído e impacto visual. Estas ferramentas permitem também efectuar uma previsão da produção total do parque e das perdas por efeito de esteira.

Relativamente à modelização da turbina eólica, existem vários aspectos a ter em consideração, nomeadamente a representação da distribuição do vento. A forma mais comum desta representação, e referenciada em Karaki, et al [17], é através de uma distribuição de Weibull, obtida a partir da seguinte função de densidade de probabilidade:

$$F_v^*(v) = \frac{k}{c} \left( \frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp \left[ - \left( \frac{v}{c} \right)^k \right] \quad (3-2)$$

em que  $v$  é a velocidade do vento em m/s,  $c$  é um parâmetro de escala e  $k$  é um parâmetro de forma.

No caso, de se pretender calcular o valor médio da velocidade, é necessário efectuar o seguinte cálculo descrito em Jangamshetti e Rau [18]:

$$\bar{v} = \int_0^\infty v \frac{k}{c} \left( \frac{v}{c} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} dv \quad (3-3)$$

Estes autores referem também que a velocidade do vento pode ser representada por uma distribuição de Rayleigh, que constitui um subconjunto da distribuição de Weibull, sendo no entanto mais simples e fácil de implementar, visto que possui um único parâmetro  $c$ . Esta distribuição é obtida por:

$$f(v) = \frac{v}{c^2} e^{-\left(\frac{v}{c^2}\right)} \quad (3-4)$$

o parâmetro  $c$  é obtido por:

$$c = \frac{\bar{v}}{1.253} \quad (3-5)$$

De seguida, é necessário transformar estes valores de velocidade do vento em potência eólica. Para tal, existem várias formas de alcançar este objectivo. Assim, em Karaki, et al [17], a capacidade de produção de uma turbina eólica pode ser obtida por:

$$C_t(v) = \begin{cases} 0 & 0 \leq v \leq v_{it} \\ a_t + b_t v^j & v_{it} \leq v \leq v_{rt} \\ R_t & v_{rt} \leq v \leq v_{ot} \\ 0 & v \geq v_{ot} \end{cases} \quad (3-6)$$

onde  $v_{it}$ , é a velocidades de *cut-in*, ou seja, a velocidade a partir da qual a turbina é accionada;  $v_{rt}$ , é a velocidade nominal e  $v_{ot}$  é a velocidade de *cut-out*, ou seja a velocidade que leva à paragem da turbina por razões de segurança;  $j$  é a ordem da curva característica entre a velocidade de *cut-in* e a velocidade nominal;  $R_t$  é a potência nominal da turbina  $t$ . As constantes  $a$  e  $b$  são obtidas a partir de expressões calculadas em função da potência nominal, das velocidades de *cut-in* e nominal e de  $j$ .

Já em Ubeda e Rodriguez [19] a transposição de valores de velocidade do vento em valores de potência é obtida através dos seguintes patamares:

- a partir da velocidade de *cut-in*  $V_{ci}$  à velocidade nominal  $V_r$ , a potência produzida varia desde zero até à potência nominal  $P_r$ ;
- a partir de  $V_r$  até à velocidade de *cut-out*  $V_{co}$ , a potência produzida é constante e com o valor da potência nominal  $P_r$ ;
- as velocidades inferiores à de  $V_{ci}$  e superiores a  $V_{co}$  a potência produzida é zero.

Para velocidades de vento compreendidas entre  $V_{ci}$  e  $V_r$ , a potência produzida é calculada utilizando a expressão quadrática:

$$P = P_r (A + BV + CV^2) \quad (3-7)$$

onde  $P_r$  é a potência nominal da turbina,  $V$  é o valor da velocidade do vento e  $A$ ,  $B$ ,  $C$  são dados de entrada.

Já em Jangamshetti e Rau [18] a potência produzida por uma turbina é obtida por:

$$P_e(v) = \begin{cases} 0 & v < V_c \\ \frac{1}{2} \rho A C_p \eta_m \eta_g v^3 & V_c \leq v < V_r \\ \frac{1}{2} \rho A C_p \eta_m \eta_g v^3 & V_r \leq v < V_f \\ 0 & v > V_f \end{cases} \quad (3-8)$$

onde  $\rho$  é a densidade do ar,  $A$  é a área de varrimento das pás da turbina,  $v$  é a velocidade do vento,  $C_p$  é o coeficiente de performance da turbina,  $\eta_m$  é a eficiência da transmissão e  $\eta_g$  é o rendimento do gerador. Neste caso, considera-se que o sistema é constituído por uma turbina, por um sistema de transmissão e por um gerador. Relativamente às velocidades  $V_c$  é a velocidade de *cut-in*,  $V_r$  é a velocidade nominal da turbina e  $V_f$  é a velocidade de *cut-out*.

A potência média produzida é obtida por:

$$P_{e,m} = \int_{V_c}^{V_r} \frac{1}{2} \rho A C_p \eta_m \eta_g v^3 f(v) dv + \int_{V_r}^{V_f} \frac{1}{2} \rho A C_p \eta_m \eta_g v^3 f(v) dv \quad (3-9)$$

A potência nominal da turbina é a potência produzida à velocidade nominal da turbina e é obtida por:

$$P_{er} = \frac{1}{2} \rho A C_p \eta_m \eta_g v_r^3 \quad (3-10)$$

É definido assim um factor de capacidade (FC) que servirá para identificar os locais com maior potencial. Este factor é calculado por:

$$FC = \frac{1}{v_r^3} \int_{V_c}^{V_r} v^3 f(v) dv + \int_{V_r}^{V_f} f(v) dv \quad (3-11)$$

em que,  $f(v)$  é a função densidade de probabilidade de Weibull ou Rayleigh.

Ubeda e Rodriguez [19] referem que devido à turbulência do vento e às características dinâmicas da turbina eólica, a curva de potência é ligeiramente diferente daquela a que os valores médios horários se referem, mas este efeito é ignorado, a não ser que seja de algum modo incluído nos valores dos parâmetros que definem a curva. A potência produzida pela turbina é também uma função da densidade do ar, que assume valores diferentes como consequência de diferentes condições de pressão e temperatura. No entanto, estes efeitos são negligenciáveis, pelo que normalmente são ignorados.

Por vezes, os valores de velocidade do vento não são recolhidos à altura correspondente, à altura do hub das turbinas eólicas a instalar num dado local. Torna-se por isso, necessário efectuar um ajuste dos valores de velocidade medidos à altura do hub. Em Ubeda e Rodriguez [19] tal ajuste é efectuado utilizando um perfil de vento standard logarítmico, utilizando para tal a seguinte expressão, em que a velocidade  $V_2$  à altura do hub  $z_2$  pode ser calculada como uma função da velocidade do vento  $V_1$  à altura de referência  $z_1$ :

$$V_2 = V_1 \frac{\ln(Z_2/Z_0)}{\ln(Z_1/Z_0)} \quad (3-12)$$

em que  $z_0$  é a grau de aspereza que caracteriza a superfície limite sólida, obtida a partir dos dados que definem o parque eólico. Vários valores típicos deste parâmetro são definidos consoante o tipo de superfície.

Em Jangamshetti e Rau [18] é utilizada a seguinte expressão:

$$\frac{V_2}{V_1} = \left( \frac{Z_2}{Z_1} \right)^\alpha \quad (3-13)$$

em que  $V_1$  e  $V_2$  são as velocidades medidas às alturas  $Z_1$  e  $Z_2$  respectivamente. O índice  $\alpha$  pode ser determinado pela seguinte expressão:

$$\alpha = \frac{\left[ \log\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \right]}{\left[ \log\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right) \right]} \quad (3-14)$$

Se a altura do *hub* da turbina é  $Z_3$  então a velocidade do vento extrapolada  $V_3$  correspondente é dada por:

$$V_3 = V_2 \left( \frac{Z_3}{Z_2} \right)^\alpha \quad (3-15)$$

Tratou-se até ao momento do problema de modelização das turbinas eólicas. A partir deste momento, passaremos a tratar do problema da modelização de um parque eólico. Assim, Ubeda e Rodriguez [19], referem que no modelo por si idealizado as avarias e reparações das máquinas são representadas por um modelo simples de dois estados. As saídas de serviço planeadas não são consideradas no modelo, visto que é assumido que a manutenção pode ser efectuada durante períodos de vento fraco, quando a produção da turbina é zero ou um valor muito baixo.

A modelização do parque eólico fornece o valor médio de produção horária, dado o valor médio horário de velocidade no local. O parque eólico é composto por um certo número de turbinas de diferentes tipos instaladas num dado local. A potência total produzida pelo parque é obtida pela soma das produções das turbinas disponíveis, face ao vento que cada uma delas está exposta. O local é descrito pela velocidade de vento que se faz sentir e pelas características do terreno, e um coeficiente de eficiência que toma em consideração perdas e outros efeitos.

A potência de cada turbina é obtida a partir do seu modelo respectivo, como função da velocidade do vento. O número de turbinas disponíveis é obtido a partir do número total, subtraindo as turbinas que se encontram avariadas. A disposição das turbinas no espaço tem uma influência na potência total produzida do parque devido ao efeito de esteira. Assim, a potência total produzida é considerada como sendo uma fracção da que seria obtida se cada turbina se encontrasse sozinha. Isto é representado no modelo, pela multiplicação da potência produzida pelo parque por um coeficiente de eficiência, que para parques cuidadosamente dispostos podem atingir um valor típico compreendido entre 0.90-0.95. Este factor deverá ser uma função do

número de turbinas eólicas no parque, e da sua disposição, mas esta dependência não é fácil de modelizar, e foi tratada como um dado de entrada.

As características topográficas do terreno são um factor importante, e deverão ser incluídas nos valores mensais médios da velocidade do vento, como valores de entrada.

O valor da potência produzida pelo parque é calculado multiplicando o número de turbinas eólicas disponíveis de cada tipo, pela potência produzida pela turbina do tipo respectivo sob a velocidade do vento no local do parque, somando os diferentes tipos, e multiplicando o resultado pelo coeficiente de eficiência do parque. Este modelo ignora as diferenças de velocidade de vento sentidas pelas turbinas dentro do mesmo parque. Isto é razoável, apesar da potência instantânea produzida em turbinas diferentes puderem ser bastante díspares, os valores médios horários irão equilibrar as variações de curta duração.

Um factor a ter em conta é relativo à avaliação da disponibilidade dos parques. Existem três métodos para determinar a disponibilidade dos parques eólicos. São eles seguir as unidades indisponíveis individualmente, seguir as unidades indisponíveis como um grupo e considerar um estado *derated* (potência a produzir inferior à potência nominal da turbina) para cada turbina.

Na indisponibilidade individual as turbinas que estão disponíveis são tratadas como um grupo, enquanto que as restantes são tratadas individualmente. Para cada unidade que avaria, um contador é inicializado com um número de horas de reparação gerado aleatoriamente, obtido a partir de uma distribuição exponencial com tempo médio de reparação, MTTR. Quando este tempo decorreu, considera-se que a unidade está em funcionamento novamente.

A indisponibilidade agrupada difere do anterior, no facto de que as unidades disponíveis e indisponíveis serem tratadas do mesmo modo. O número de unidades em cada grupo, que mudam de estado em cada hora, é calculado do mesmo modo como indicado no método anterior para as unidades disponíveis, e o número de unidades disponíveis e indisponíveis são actualizado de acordo com os resultados obtidos.

A terceira opção, consiste no *derating*, ou seja, a diminuição da produção de cada turbina, multiplicando-a pela sua disponibilidade. Esta é uma abordagem menos realística, mas é mais rápida, e pode dar uma boa aproximação se o número de turbinas for considerado grande.

Outra modelização para a avaliação da disponibilidades é apresentada em Karaki et al [17], se bem que neste caso ao parque eólico se encontra associado um sistema diesel. Assim, a turbina eólica é modelizada como um processo de Markov de dois estados, um referente à capacidade nominal  $R_t$  e o outro ao modo de avaria dado pela taxa de avarias  $q_t$ . Para uma velocidade de vento  $v_i$  a capacidade disponível é obtida através da expressão 3.7. Se considerar-

se que  $O_t$  é a distribuição de probabilidade discreta dos níveis de capacidade de  $N_t$  turbinas do tipo  $t$ :

$$O_t = \{P_t(n), F_t(n) : n = 0 \dots N_t\} \quad (3-16)$$

em que  $P_t(n)$  é o nível de capacidade quando  $n$  de  $N_t$  turbinas estão fora de serviço. As probabilidades correspondentes são obtidas utilizando uma distribuição Binomial.

Quando estão a ser modelizados, vários tipos de turbinas, as distribuições de probabilidade correspondentes são obtidas pela convolução das distribuições dos vários tipos utilizando um algoritmo recursivo. Assim, a distribuição de probabilidade dos níveis de capacidade das turbinas de todos os tipos, à velocidade  $v_i$ , são representadas por:

$$O_c = \{P_c(l), F_c(l) : l = 0 \dots N_c\} \quad (3-17)$$

Finalmente a modelização do parque eólico é obtida pela combinação das distribuições de probabilidade dos níveis de capacidade das turbinas eólicas devido a avarias em várias velocidades de vento. Cada distribuição encontra-se condicionada à velocidade do vento  $v(i)$  com a probabilidade de  $F_v(i)$ .

Relativamente à modelização do sistema Diesel, este é representado também por uma função de distribuição de probabilidade discreta dada por:

$$D = \{P_D(j), F_D(j) : j = 0 \dots N_D\} \quad (3-18)$$

onde  $P_D(j)$  e  $F_D(j)$  são os níveis de potência discretos e as probabilidades associadas obtidas por convolução das funções de distribuição de probabilidades discretas de cada uma das unidades diesel.

Os eventos ou estados dos modelos do parque eólico e do sistema diesel são independentes, e portanto a modelização conjunta dos dois sistemas pode ser obtida por convolução. Contudo, tal modelização não leva em consideração práticas de operação que conduzem à manutenção da estabilidade do sistema. Isto exige que a capacidade do sistema eólico seja apenas uma porção da capacidade total do sistema, que é conhecido por nível de penetração. Assim, para quaisquer dois estados  $i$  e  $j$  de vento ( $W$ ) e diesel ( $D$ ) é exigido que:

$$P_w(i) \leq \alpha(P_D(j) + P_w(i)) \quad (3-19)$$

em que  $\alpha$  é o nível de penetração de energia eólica definido como o rácio máximo da capacidade total eólica-diesel relativamente à capacidade total de operação do sistema. A selecção de  $\alpha$  pode ser efectuada tendo como base anteriores concepções de sistema ou num simples modelo dinâmico para estimar a taxa de descida de frequência permitida, quando a energia eólica não possa ser despachada devido a ventos fortes ou fracos.

Deste modo, o modelo do sistema global eólico-diesel é dado por:

$$G = \{P_G(k), F_G(k) : k = 0 \dots N_G\} \quad (3-20)$$

onde:

$$P_G(k) = \begin{cases} \frac{P_D(j)}{1-\alpha} & \text{se } P_w(i) > \frac{\alpha}{1-\alpha} P_D(j) \\ P_D(j) + P_w(i) & \text{se } P_w(i) \leq \frac{\alpha}{1-\alpha} P_D(j) \end{cases} \quad (3-21)$$

$$F_G(k) = F_D(j) F_w(i) \text{ com } k=i+j \quad (3-22)$$

A energia produzida esperada, EEP, por um sistema eólico/diesel é calculada pela combinação da sua função de densidade de probabilidade discreta, com uma curva de duração de carga (LDC), que representa a variação da carga durante o período de tempo em estudo. Assim, assume-se que as curvas de duração de carga durante os diferentes períodos de tempo são obtidos por:

$$LDC_f = \{L_f(n), T_f(n); n = 0 \dots N_f\} \quad f=1 \dots K_f \quad (3-23)$$

onde  $N_f$  é o número de pontos em  $LDC_f$ ,  $K_f$  é o número de períodos e  $T_f(n)$  é a duração em unidades de tempo (por exemplo, horas) para os quais a carga iguala ou excede  $L_f(n)$  em kW.

Dado o sistema eólico/diesel e as curvas das cargas, procede-se de seguida à determinação da EEP pelas unidades diesel e os correspondentes custos de produção através de um processo de deconvolução das unidades pela ordem económica decrescente. A energia



esperada não fornecida ( $EENS_N(f)$ ) pela totalidade das unidades, pode ser calculada pela combinação do modelo do sistema global eólico/diesel com a curva da carga  $L_f$ . Se a última unidade for removida por um processo de deconvolução, então a EENS das restantes unidades pode ser calculada como  $EENS_{N-1}(f)$ . A energia produzida esperada pela última unidade pode ser deduzida a partir de:

$$EEP_N(f) = EENS_{N-1}(f) - EENS_N(f) \quad (3-24)$$

A energia produzida esperada das restantes unidades pode ser calculada de uma forma semelhante.

Os passos necessários para simular a operação do sistema considerando a estabilidade do sistema podem ser resumidos nos próximos passos:

- construir o modelo do sistema eólico;
- construir o modelo do sistema diesel;
- construir o modelo global do sistema eólico/diesel considerando a estabilidade do sistema;
- proceder à deconvolução das unidades diesel, uma de cada vez, em ordem económica inversa e calculando os custos de produção respectivos.

A EENS de uma carga pelo sistema eólico/diesel é calculada do seguinte modo:

$$EENS_f^j = E_f^j F_G(j) \quad (3-25)$$

em que  $E_f^j$  é a energia não fornecida no período  $f$ , quando o estado  $j$  do sistema eólico/diesel ocorre com uma probabilidade  $F_G(j)$ .

Quando a capacidade da bateria está disponível durante o período  $f$ , com uma energia  $E_B(f)$  a EENS é dada por:

$$EENS_j^f = \begin{cases} (E_f^j - E_B(f)) F_G(j) & E > E_B(f) \\ 0 & E_f^j \leq E_B(f) \end{cases} \quad (3-26)$$

e o EENS no período de tempo  $f$  é:

$$EENS(f) = \sum_{j=0}^{N_G} EENS_f^j \quad (3-27)$$

e o EENS total é a soma dos EENS(f) de todos os períodos.

O índice de fiabilidade, EIR, é então obtido por:

$$EIR = 1 - \frac{EENS}{E_o} \quad (3-28)$$

em que  $E_o$  é a energia total exigida pelo sistema representada pela área total sob o LDC.

A energia disponível na bateria é diferente em cada período de tempo, devido aos ciclos de carga e descarga que ocorreram no período de tempo anterior. A energia disponível na bateria no início do período  $f$  é calculado por:

$$E_B(f) = E_B(f-1) - EED_B(f-1) + EER_B(f-1) \quad (3-29)$$

com  $E_B(1) = E_{B0}$ , onde  $EED_B(f-1)$  é a energia esperada de descarga da bateria e  $EER_B(f-1)$  é a energia esperada de carga, isto para o intervalo  $f-1$ . A energia esperada de descarga é dada por:

$$EED_B(f-1) = EENS(f-1) - EENS_B(f-1) \quad (3-30)$$

em que  $EENS(f-1)$  é a energia esperada não fornecida sem a bateria e  $EENS_B(f-1)$  é a energia esperada não fornecida quando a bateria está disponível. A energia esperada para recarregar a bateria é calculada com:

$$EER_B(f) = \sum_{j=0}^{N_G} \bar{E}_j^f F_G(j) + D_f P_\Delta(f) \quad (3-31)$$

onde  $\bar{E}_j^f$  é a energia disponível para recarregar a bateria utilizando a capacidade de energia eólica, quando ocorre o estado  $j$  durante o intervalo de tempo  $f$ . O segundo termo representa a energia disponível da turbina eólica que foi desligada devido a instabilidade;  $D_f$  é a

duração do período  $f$  e  $P_{\Delta}(f)$  é a potência eólica esperada desligada no intervalo de tempo  $f$ , que é calculada do seguinte modo:

$$P_{\Delta}(f) = \left[ \sum_{j=0}^{N_G} P_G(j) F_G(j) \right]_{\alpha=1} + \left[ \sum_{j=0}^{N_G} P_G(j) F_G(j) \right]_{\alpha=\alpha_s} \quad (3-32)$$

A primeira parcela é a potência esperada no período  $f$  assumindo que não existem restrições para o nível de penetração de eólica (i.e.  $\alpha=1$ ); o segundo termo é a potência esperada para o nível de penetração especificado pela *utility*. A  $EER_B$  é utilizada para deduzir um limite superior na dimensão da bateria. Por exemplo, para um período de estudo de uma semana e um ciclo de carga/descarga de um dia, o limite superior da bateria é obtido por  $EER_B/7$ .

### **3.4 Solar Fotovoltaico e Térmico – Princípio de Funcionamento**

A energia solar pode ser aproveitada sobre duas vertentes, a fotovoltaica e a térmica. Nesta fase apresenta-se uma descrição relativamente aos aspectos tecnológicos necessários ao aproveitamento fotovoltaico e térmico da energia solar. No entanto, a modelização a desenvolver debruçar-se-á apenas sobre a componente fotovoltaica modelização cuja análise será mais aprofundada.

A energia solar fotovoltaica tem conhecido um grande desenvolvimento nos últimos anos, fazendo com que a sua utilização se torne mais comum. À semelhança da restante produção distribuída os sistemas fotovoltaicos tanto podem ser utilizados em locais isolados como ligados à rede eléctrica.

Vários são os componentes que compõem um sistema fotovoltaico:

- Células fotovoltaicas que ligadas em série ou em paralelo constituem um painel fotovoltaico;
- Grupo acumulador, geralmente baterias;
- Inversor de corrente;
- Regulador.

### **3.5 Princípio de funcionamento de um sistema solar fotovoltaico**

De seguida, apresenta-se uma breve descrição dos principais componentes que constituem um sistema solar fotovoltaico e térmico.

#### **3.5.1 Células Fotovoltaicas**

Células solares são feitas de finas camadas, normalmente de silício cristalino (actualmente o rendimento tem valores entre 10% e 16%, o que reflecte o resultado de investigação que permitiu a evolução desde os 6% de 1975), ou amorfo (apareceram em 1983, com valores de rendimento na ordem dos 2,5% e, apesar de serem menos eficientes, poderão vir a ser competitivos pois são produzidos em grande escala, estando hoje implantados no mercado com rendimentos entre 4% e 6%) e um material semiconductor que converte a radiação solar directamente em electricidade. Uma das camadas tem característica eléctrica positiva e a outra negativa. Quando a luz incide sobre a camada negativa alguns fotões são absorvidos libertando electrões e gerando uma corrente eléctrica que percorre o circuito externo, que por sua vez se fecha através da camada semicondutora positiva [20].

Mas vários têm sido os tipos de células fotovoltaicas que tem surgido, sendo no entanto as de silício, as mais utilizadas actualmente. Deste modo, de seguida faz-se uma recolha de todos os tipos de células que existem actualmente no mercado [21], [22]:

- Células de silício: como já se referiu estas são as mais comuns, se bem que existem três tipos de células de silício, que são as de silício monocristalino, silício multicristalino e as de silício amorfo. O silício é muito utilizado devido à sua grande abundância, mas para poder ser utilizado na indústria solar tem de ser refinado até atingir um grau de pureza de 99.9999%.  
A estrutura molecular do silício é uniforme o que o torna ideal. O silício monocristalino é feito a partir de um único cristal de silício retirado de um banho de silício derretido. Este cristal é cortado numa forma geométrica próxima do quadrado.

O silício multicristalino é obtido pela fusão de silício em moldes cerâmicos, arrefecendo-o depois durante um número elevado de horas de modo a que as impurezas venham à superfície, retirando-as depois e cortando em fatias quadradas ou rectangulares o silício restante.

O silício monocristalino é mais eficiente para uma mesma unidade de área do que o silício multicristalino, enquanto que o silício monocristalino tem uma eficiência (em laboratório) de 24%, o silício multicristalino tem uma eficiência de 17.8%.

No que respeita ao silício amorfo, o silício é vaporizado e depositado em vidro ou em aço inoxidável. Este tipo de silício produz células menos eficientes, mas a célula tem apenas 1/15 da espessura de uma célula de silício mono ou multicristalino. Também os custos de produção são inferiores relativamente aos outros métodos. Este tipo de silício tem uma eficiência de 13%.

- Células de *fullerene*: este tipo de células utiliza átomos de carbono C60 sendo discutido actualmente até que ponto a sua utilização é viável. C60 tem uma forma de uma esfera geodésica tendo uma aparência muito similar à grafite, tal como algumas das suas propriedades. O maior desafio reside em descobrir a forma dos electrões poderem “saltar” de esfera em esfera sem que pelo meio sejam apanhados.
- Células nanocristalinas: neste tipo de células existe uma diferenciação entre o processo de absorção da luz e a extracção do electrão, ao contrário do que acontece nas restantes células. Isto evita que o semiconductor tenha uma pureza muito elevada, reduzindo assim os custos da energia solar. Nas células nanocristalinas, uma matriz sensível à luz absorve-a e liberta um electrão que é transmitido a um semiconductor.
- Células de camadas finas de materiais compostos: devido aos problemas do silício tem crescido o interesse em fazer as células solares de materiais que não o silício. Um dos primeiros a ser desenvolvido foi o “*Gallium-Arsenide*” (GaAs) e constitui um dos produtos mais eficientes que foram produzidos até hoje (cerca de 30% de eficiência). GaAs é um composto semiconductor formado por elementos Gálio e Arsénico. No

entanto as suas aplicações são raras já que o Gálio é mais raro que o ouro e o Arsénico é venenoso. Outros compostos semicondutores têm sido utilizados como por exemplo o *Copper Indium Gallium Diselenide* (CIGS) e o *Cadmium Telluride* (CdTe) com eficiências da ordem dos 18% e 16% respectivamente.

- Células de película fina: em células de silício cristalino normal a wafer é feita com uma espessura suficiente para a célula se suportar a si própria e absorver a luz suficiente. As células são assim de algumas centenas de micrómetros de espessura. As células de película fina são feitas de materiais que absorvem melhor a luz que o silício, e portanto necessitam de menos material. As camadas finas de material podem ser depositadas umas depois das outras em material de suporte económico. Estas técnicas têm o potencial de serem adaptadas para a produção em massa. Esta concepção permite que não seja necessário interligar as células individualmente para formar um módulo, de facto tudo o que é necessário para fazer um módulo, incluindo os contactos e encapsulamento, são feitos numa série de passos. Até hoje este tipo de módulos celulares ainda não são mais económicos que os que utilizam as células de silício, mas muito fabricantes estão a trabalhar para as melhorar.
- Células multijunção: são células com diferentes bandas de valência que são empilhadas sucessivamente. A célula colocada no topo tem a banda de valência superior, deste modo fotões com menos energia passarão para a célula seguinte. Como as células multijunção tem materiais com diferentes bandas de valência, pode utilizar uma maior energia do sol. Este tipo de células têm como desvantagens um elevado custo quer do material utilizado bem como de produção. Ao nível de eficiência alcançada esta situa-se nos 30.3%.
- Células concentradoras: são utilizadas principalmente em investigação. São células de elevada eficiência (geralmente de GaAs ou de silício monocristalino) que são encerradas num dispositivo que foque a luz, como por exemplo uma lente. Pelo uso da lente aumentam-se os níveis de insolação, logo as células produzem uma maior potência. A

motivação que existe no desenvolvimento deste tipo de células é que será necessário uma área menor, devido à concentração da luz. Para este tipo de células já se obtiveram, em laboratório, eficiências na ordem dos 33%.

Outros tipos de células têm se desenvolvido, como as células foto-electroquímicas e as células de silício esférico, mas encontram-se ainda numa fase de estudo laboratorial.

Uma vantagem dos sistemas fotovoltaicos é a sua modalidade, já que através da combinação, em série ou paralelo, das células é possível obter a potência que se pretende formando desta forma um array. Ao nível da potência das células estas possuem uma gama que pode ir actualmente desde dos 5 W aos 300 W. As células solares de 300 W podem atingir uma tensão de pico de 51 V e uma corrente de pico de 5.9 A.

### **3.5.2 Baterias**

As baterias nos sistemas fotovoltaicos tem como principal objectivo acumular a energia que é utilizada quando não há radiação suficiente, sendo necessárias quando os sistemas encontram-se isolados da rede .

As mais utilizadas normalmente são as baterias de chumbo, ou ácidas [23]. Existem actualmente baterias ácidas com válvulas de ligação reguladas, com capacidades compreendidas entre os 5-1000 Ah. Outro tipo de baterias ácidas desenvolveram-se a partir da “*Deep cycle technology*”, ou seja elas são capazes de descarregar uma quantidade significativa da energia que armazenaram antes de voltar a recarregar, e os seus componentes internos são igualmente adequados para ciclos rápidos de carga e descarga ou para regimes contínuos de baixa potência.

Também poderão ser utilizadas baterias de cádmium níquel (alcalinas) mas só em locais com condições climáticas adversas ou em locais em que é necessário grande fiabilidade [24]. Tem como vantagens relativamente às baterias ácidas o facto de serem robustas, leves, resistentes a temperaturas extremas, tem baixas taxas de auto descarga e aguentam profundidades de descarga que podem chegar abaixo dos 10%. Como desvantagens apresentam o facto da sua capacidade diminuir com o aumento do número de ciclos de descarga e o seu preço.

### 3.5.3 Inversores

Peça fundamental nos sistemas fotovoltaicos são os inversores, já que a corrente produzida é contínua e esta terá de ser convertida para corrente alternada para assim o sistema poder ser ligado à rede.

Os inversores actualmente são aparelhos electrónicos altamente sofisticados. Existem actualmente inversores que poderão se adequar mais a sistemas isolados ou ligados à rede. Exemplo da primeira situação é o inversor da série SW da Trace Engineering [25], que é próprio para sistemas solares/híbridos de média/grande dimensão, e fornecem uma potência de grande qualidade. Podem ainda ser ligados em paralelo para aumentar a capacidade conforme as necessidades. Podem ser utilizados em sistemas que produzem uma tensão de 12, 24, 36 ou 48 V AC, convertendo-os para 250 V DC e tendo como corrente máxima AC 34 A.

Existem para sistemas mais pequenos, inversores de onda quadrada atenuada (ou modificada). Os inversores de onda quadrada atenuada constituem opções válidas em aplicações onde não seja necessário uma perfeita onda sinusoidal, de facto 80% dos sistemas fotovoltaicos utilizados em habitações poderão utilizar este tipo de inversores. Como inversor carregador (inverser charger) oferece excelentes comportamentos e eficiência em sistemas de pequena dimensão, sendo assim mais económicos que os sistemas em que existe um inversor, baterias e controlos auxiliares. Se o inversor tiver em conjunto um sistema de baterias e um sistema de monitorização constituirá uma solução válida para pequenos sistemas.

Como já se referiu existem inversores destinados exclusivamente para sistemas que ficarão ligados à rede. Estes tipos de inversores são quase completamente automáticos, altamente eficientes e incluem um sistema denominado *Maximum Power Point Tracking* (MTTP) que assegura a produção máxima de potência. Obedece a todas as normas internacionais standard sobre a qualidade da potência. Existe ainda uma interface opcional para registo dos dados permitindo assim o controlo remoto de todos os parâmetros chave. Estes tipos de inversores não necessitam que baterias estejam associadas ao sistema fotovoltaico.

### 3.5.4 Regulador de carga



Existe em alguns sistemas fotovoltaicos um controlador de carga que tem a função de controlar o uso eficaz da energia produzida e efectuar a protecção das baterias. Estão disponíveis modelos para 12, 24, 36 ou 48 V e que suportam correntes de carga da ordem dos 50 A.

O regulador apresenta dois períodos de operação para carregar as baterias e as proteger de danos provocados por sobrecargas [26]. O regulador monitoriza a tensão das baterias através de um relé.

- Período 1: *Full Charge* - a tensão gerada pelas células solares irá carregar as baterias. Toda a corrente disponível pelas células passará para as baterias e assim subir a sua tensão, até que estas atinjam o seu valor máximo.
- Período 2: *Float Charge* - depois da tensão da bateria atingir o seu valor máximo o regulador prossegue a carga da bateria a uma taxa reduzida. À medida que a bateria aproxima-se da tensão de estabilização (float voltage), a corrente diminuirá atingindo eventualmente a sua corrente de manutenção.

O regulador protege as baterias dos danos provocados por descargas intensas, através da desligação das cargas. O ponto a que se dá desligação é compensado pela corrente da carga, e tem um atraso no tempo para prevenir desligações intempestivas. Quando a desligação se dá o relé da carga é actuado e este abre. O carregamento normal da bateria irá continuar e quando o ponto de tensão para a qual se dá a ligação das cargas for atingido, esta será feita automaticamente.

O regulador possibilita a máxima utilização do *array* durante o período de carga, através da ligação directa do *array* à bateria quando esta baixa de um certo nível de carga. A protecção contra sobreintensidades é efectuada por disjuntores (circuit breakers). Durante a noite o *array* será desligado por um temporizador de forma a prevenir fluxos de corrente contrários. Sensores remotos colocados na bateria permitem monitorizar com precisão a tensão na bateria.

Outros controladores existem em que as baterias são manobradas em 3 períodos distintos [27]:

- *Boost charge*: impede que a regulação da bateria se faça antes que esta não atinja um elevado nível de carga;

- *Equalisation*: mantêm a bateria ao nível do *boost charge* para assegurar que todas as baterias atinjam o mesmo nível de carga e para remover electrólito estratificado;
- *Float charge*: aplica um nível pequeno de regulação para reduzir a gaseificação do electrólito e aumentar o período entre manutenções.

A regulação da carga é realizada pela desligação sequencial de secções do *array* de forma a regular a corrente que irá carregar a bateria. A redundância inerente a este processo aumenta significativamente a fiabilidade do sistema. Tal como no regulador anterior este também desliga as baterias da carga, em caso do abaixamento acentuado dos níveis de carga. Além disso, este regulador dispõe de dois dispositivos que desligam as cargas, permitindo assim a interrupção da alimentação de cargas menos importantes e deste modo diminuir a carga na bateria e aumentar o tempo antes da desligação das cargas principais.

Existem contactos sem tensão com o objectivo de dar um sinal de aviso da desligação da carga devido à diminuição da tensão e também assinalar uma possível avaria do regulador. A medição da tensão da bateria, corrente do *array* e corrente da carga estão incluídos juntamente com um dispositivo de diagnóstico que permite a verificação de todas as funções de controlo e a indicação da regulação e os níveis de calibração. Também dispõem de dispositivos de bloqueio para prevenir a descarga da bateria para o *array* durante a noite, supressão de sobretensões contra transitórios induzidos nos cabos devidos a trovoadas e estão protegidos contra a ligação da bateria com a polaridade trocada.

### **3.6 Princípio de funcionamento de um sistema solar térmico**

Outro tipo de aproveitamento da energia solar é a energia solar térmica. cujo princípio funcionamento é baseado na conversão da radiação solar em energia térmica, podendo esta ser amplificada através de colectores solares [28]. Estamos neste caso, perante um aproveitamento da energia solar térmica activa.

O colector solar é o dispositivo responsável pela absorção e transferência da radiação solar para um fluido sob a forma de energia térmica e é neste ponto que difere do painel fotovoltaico. Os colectores solares poderão ser de vários tipos:

- planos;
- concentradores;
- CPC ou concentradores parabólicos compostos;
- de tubo de vácuo.

O segundo tipo de aproveitamento da energia solar térmica é o que normalmente se designa por passivo. Neste caso, o aproveitamento da energia solar, consiste no aproveitamento e optimização através da incidência dos raios solares sendo utilizada para o aquecimento de edifícios ou prédios, através de concepções e estratégias construtivas [29].

### **3.6.1 Colector plano**

Este tipo de colector é o mais comum e destina-se à produção de água quente a temperaturas inferiores a 60 °C [29].

Um colector plano é formado por:

- cobertura transparente: para provocar o efeito de estufa e reduzir as perdas de calor e ainda assegurar a estanquicidade do colector.
- placa absorsora: serve para receber a energia e transforma-la em calor, transmitindo-a para o fluido térmico que circula por uma série de tubos em paralelo ou serpentina. Para obter maiores rendimentos existem superfícies selectivas que absorvem como um corpo negro, mas perdem menos radiação.
- caixa isolada: serve para evitar perdas de calor uma vez que deverá ser isolada térmicamente, para dar rigidez e proteger o interior do colector, dos agentes externos.

Ao fazer circular o fluido térmico através dos tubos dos colectores, retira-se calor destes podendo aproveitar este calor para aquecer um depósito de água.

### **3.6.2 Colectores concentradores**

Para atingir temperaturas mais elevadas há que diminuir as perdas térmicas do receptor. No entanto, as perdas térmicas são proporcionais à superfície do receptor. Reduzindo a área de recepção em relação à superfície de captação, consegue-se reduzir as perdas térmicas na proporção dessa redução.

Os sistemas assim concebidos chamam-se concentradores, e concentração é precisamente a relação entre a área de captação (a área de vidro que serve de tampa à caixa) e a área de recepção.

Acontece que, quanto maior é a concentração mais pequeno é o ângulo com a normal aos colectores segundo o qual têm que incidir os raios solares para serem captados, pelo que o colector tem de se manter sempre perpendicular aos raios solares, seguindo o sol no seu movimento aparente diurno.

Esta é uma desvantagem, pois o mecanismo de controle para fazer o colector seguir a trajectória do sol, é bastante dispendioso e complicado, para além de só permitir a captação da radiação directa.

### **3.6.3 CPC ou colectores concentradores parabólicos**

O desenvolvimento da óptica permitiu muito recentemente a descoberta de um novo tipo de concentradores (chamados CPC ou Winston) que combinam as propriedades dos colectores planos (também podem ser montados em estruturas fixas e têm um grande ângulo de visão o que também permite a captação da radiação difusa) com a capacidade de produzirem temperaturas mais elevadas ( $>70^{\circ}\text{C}$ ), como os concentradores convencionais do tipo de lentes .

A diferença fundamental entre estes colectores e os planos reside na geometria da superfície de absorção, que no caso dos CPC's é constituída por uma grelha de alhetas em forma de acento circunflexo, colocadas por cima de uma superfície reflectora. A captação solar realiza-se nas duas faces das alhetas já que o sol incide na parte superior das alhetas e os raios que são reflectidos acabam por incidir na parte inferior das alhetas, aumentando assim ainda mais a temperatura do fluido e diminuindo as perdas térmicas. Poderão existir concentradores parabólicos compostos acoplados a um sistema que permita acompanhar a trajectória do Sol ("Tracking System"), aumentando a eficiência do colector.

### 3.6.4 Colectores de tubo de vácuo

Estes consistem geralmente em tubos de vidro transparente cujo interior contém tubos metálicos (absorvedores). A atmosfera interior dos tubos é livre de ar, eliminando-se assim perdas por convecção e condução, elevando assim o rendimento a altas temperaturas devido a menores coeficientes de perda a eles associados.

Estes colectores têm melhores eficiências do que simples colectores planos devido a um conjunto de razões, a saber:

- possibilidade de os concentradores evacuados captarem tanto radiação directa como radiação difusa, esta característica combinada com o facto de o vácuo minimizar as perdas de calor para o exterior, torna estes colectores extremamente úteis em zonas de onde costuma imperar mau tempo.
- o formato circular dos colectores permite captar a radiação directa durante quase a totalidade do dia, ao contrário dos colectores planos, que se encontram fixos e apenas têm radiação directa a meio do dia.

### 3.6.5 Tipos de sistemas solares térmicos

Os dois principais tipos de sistemas de energia solar térmica são [29]:

- circulação em termossifão;
- circulação forçada.

#### *Circulação em termossifão*

O mesmo fluido a temperaturas diferentes tem também densidades diferentes, quanto maior é a sua temperatura menor a sua densidade. Por isso, quando se aquece um fluido, este tem tendência a estratificar-se ficando a parte mais quente na zona superior. No sistema de termossifão a água aquecida pelo Sol no colector, sobe "empurrando" a água mais fria do depósito, forçando-a a tomar o seu lugar, descendo, para subir novamente quando, por sua vez

for aquecida. O depósito deve ficar acima do colector, senão dá-se o fenómeno inverso quando já não houver sol (termossifão invertido).

Estes sistemas são compostos pelo colector solar, depósito acumulador, purgador, vaso de expansão e outros pequenos acessórios.

### *Circulação forçada*

Nas situações em que não é viável a colocação do depósito acima da parte superior dos colectores, e para os grandes sistemas em geral, é necessário usar bombas electrocirculadoras para movimentar o fluido térmico. A bomba poderá ser comandada por um sistema de controle automático (o comando diferencial).

O sistema de controle (comando diferencial) está regulado de modo a colocar a bomba em funcionamento, logo que a diferença de temperatura entre os colectores e o depósito seja de 5 °C.

Estes sistemas são compostos pelo colector solar, depósito acumulador, bomba electrocirculadora, controlador diferencial, purgador, vaso de expansão e outros pequenos acessórios.

### **3.6.6 Principais aplicações:**

De seguida referem-se as principais aplicações deste tipo de tecnologia:

- produção de Água Quente Sanitária (AQS), para uso doméstico, hospitais, hotéis, etc.: temperatura inferiores a 60°C, com períodos mínimos de utilização do equipamento solar entre oito e dez meses por ano. Estas instalações dimensionam-se, normalmente, para as necessidades energéticas anuais, evitando assim excedentes energéticos nos meses de verão;
- aquecimento de piscinas: dependendo do tipo e finalidade da piscina, os valores da temperatura de utilização variam entre 25-35°C, sendo possível a aplicação a piscinas de utilização anual ou sazonal (verão);

- aquecimento ambiente: do ponto de vista tecnológico é possível a utilização da energia solar para o aquecimento ambiente de forma activa dos edifícios, no entanto esta aplicação está limitada pela utilização em apenas 3 a 4 meses por ano, sendo assim economicamente menos interessante;
- arrefecimento ambiente: é possível produzir frio combinando energia solar com máquinas de absorção ou sistemas híbridos (solar-gás), que operam a temperaturas na ordem dos 80 °C (máquinas de Brometo de Lítio), ou 120 °C (máquinas de Amónia/H<sub>2</sub>O), o que, combinado com o aquecimento ambiente no inverno, tornam estas aplicações muito interessantes, quer do ponto de vista ambiental com a redução de consumo de energia primária, quer do ponto de vista económico, com a rentabilização total do sistema;
- produção de água a elevadas temperaturas destinada a uso industrial: temperaturas superiores a 80 °C e 100 °C (água saturada ou vapor), com aplicações industriais directas, de pré-aquecimento de água de processo, ou vapor para produção de energia eléctrica (temperaturas superiores a 450 °C);
- outras aplicações: aplicações de baixa ou intermédia temperatura, como estufas, secadores desalinizadores, secadores, destoxificadores (Ultra Violeta) e ainda cozinhas solares.

### **3.7 Modelização da Energia Solar Fotovoltaica**

Nesta fase, apresenta-se o estado da arte relativamente à modelização e previsão da radiação solar. Refira-se que a radiação solar vai ser um dos aspectos principais a incluir no modelo solar fotovoltaico.

Assim, segundo Alfayo e Uiso [30] os modelos de estimação da radiação solar são mais precisos se os dados recolhidos se referirem a uma duração de 20 ou mais anos. Estes dados deverão incluir valor médios de horas de radiação, radiação solar global, humidade relativa do ar, temperatura máxima do ar, latitude e altitude dos diferentes locais.

A radiação solar incidente num dado local é influenciada em maior ou menor medida por grande número de parâmetros geográficos, físicos e meteorológicos. O modelo desenvolvido

neste artigo foi baseado em certos parâmetros meteorológicos, nomeadamente, horas de sol, temperatura máxima do ar e humidade relativa.

Para um melhoramento do modelo considerou-se um parâmetro de condição atmosférica  $\Omega$  que leva em consideração o efeito das partículas de poeiras, fumo, vapor de água e moléculas de ar na dispersão e absorção da radiação solar na sua passagem pela atmosfera. Este parâmetro é útil para na estimação da radiação solar global para ambientes poluídos e não poluídos.

A estimação da radiação solar é efectuada através da seguinte expressão:

$$H = \alpha K \exp[a_1 \phi^a (b_1 D^b + c_1 R^c + d_1 T^d + e_1 \Omega^e)] \quad (3-33)$$

de referir que seria possível incluir na expressão outras parcelas que se refeririam a outros factores que influenciam a radiação solar, mas que os autores optaram por não incluir, já que são negligenciáveis.

Assim,  $\alpha$ ,  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $c_1$ ,  $d_1$ ,  $e_1$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$ , são coeficientes estatísticos que são obtidos a partir dos valores medidos.  $\phi$  é a latitude do local,  $D = n/N$  em que  $n$  é o número de horas em que o sol brilha e  $N$  é a duração do dia (horas de sol) dado por:

$$n = 2 / 15 \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (3-34)$$

e  $\delta$  é o ângulo de inclinação solar que pode ser calculado por:

$$\delta = \sin^{-1}(0.398 \cos[0.986(M - 173)]) \quad (3-35)$$

em que  $M$  é o número do dia do ano a partir de 1 de Janeiro, como dia 1-365.

$R$  é a humidade relativa em percentagem,  $T$  é temperatura média das máximas do mês em °C,  $K$  é um factor sazonal dado por:

$$K = 4.19(\lambda N + \psi_{ij} \cos \phi) \quad MJ / m^2 \quad (3-36)$$

onde  $\lambda$  é o factor de latitude dado por:



$$\lambda = 0.2 / (1 + 0.1\phi) \quad (3-37)$$

e  $\psi_{ij}$  é o factor de padrão,  $i = A, B, C, D \dots$  (zonas geográficas) e  $j = 1, 2, 3, 4 \dots 12$  (mês do ano).

O parâmetro relativo às condições meteorológicas ( $\Omega$ ) pode ser calculado utilizando os seguintes métodos:

1 -  $\Omega = \sigma(H_m/H_o) + \eta$  em que  $H_m$  é a radiação solar medida e  $H_o$  é a radiação solar extraterrestre. Este valor é uma dada constante, com pequenas variações devido às mudanças de latitude. Tipicamente os valores de  $\sigma$  e  $\eta$  são  $-0.47$  e  $0.49$  respectivamente.

2 -  $\Omega = \sigma D + \eta$  em que  $D$  é definida em cima. Já as constantes  $\sigma$  e  $\eta$  são  $-0.26$  e  $0.39$  respectivamente.

Com este modelo é possível avaliar o potencial da energia solar num dado local e assim verificar da possibilidade de instalação num dado local de um painel fotovoltaico.

O modelo de estimação torna-se assim:

$$H = \alpha K \exp[\phi(D^b - 0.01R^{0.33} - T^{-1}\Omega^2)] \quad (3-38)$$

onde  $0.81 \leq \alpha \leq 1.31$ , dependendo da exigência das zonas.

Já para Al-Awadhi [31] a radiação global pode ser representada como a realização do processo denominado de “decomposição clássica”, i.e. a série  $\{Y_t\}$  pode ser apresentada da seguinte forma:

$$Y_t = \mu_t + X_t \quad (3-39)$$

em que  $\mu_t$  representa a tendência periódica ou componente determinística e  $X_t$  representa a componente estocástica ou série estacionária com valor médio 0 e variância  $\sigma_x^2$ . Devido às

mudanças cíclicas na inclinação solar, é efectuada a separação das flutuações diárias das variações sazonais. Para a previsão de curto prazo, os modelos do tipo ARMA tendem a adaptar-se bastante bem aos dados. Contudo estes modelos dão resultados piores para previsões de longo prazo, porque não consideram a natureza periódica do fenómeno. Deste modo, cada termo da equação anterior é determinada separadamente. A primeira parcela é modelizada utilizando uma série de Fourier, enquanto que a segunda parcela é modelizada através de um modelo estocástico não linear.

A partir de dados recolhidos referentes à radiação solar, pelo período de 3 anos na região do Kuwait, é possível verificar as tendências periódicas anuais e o comportamento não estacionário. Verifica-se igualmente que existem mudanças profundas no processo, especialmente no início de cada ano. Isto deve-se ao tempo encoberto no Inverno e à presença de pó no ar durante o Verão. Assim, os dados foram separados em dois regimes, um para tempo limpo e outro para tempo não limpo, e então é proposto um modelo que incluirá diferentes termos para cada estado dependendo se o local da observação está no primeiro regime ou no segundo.

Para determinar se uma dada radiação solar pertence aos dias limpos ou não limpos, é inicialmente calculado a duração máxima possível de horas de sol para cada mês através da seguinte expressão:

$$N = \arccos(-\tan \varphi \tan \delta) / 7.5 \quad (3-40)$$

onde  $\varphi$  é a latitude e  $\delta$  é a inclinação média mensal. Então é medida a duração média de horas de sol de cada dia; e se este valor for superior ou igual a  $N/2$  então considera-se esse dia como dia limpo, caso contrário será dia não limpo.

Existem vários métodos para remover as tendências obvias em séries temporais. A tendência anual (365 dias)  $\mu_t$  da radiação diária  $Y_t$  pode ser estimada pela utilização de séries de Fourier com  $k$  número de harmónicos. Isto tanto para dias limpos como dias não limpos, do seguinte modo:

$$\mu_t = \sum_{j=1}^2 \mu_{0j} C_{0j} + \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^k [\alpha_{ij} \cos(\omega_i t) + \beta_{ij} \sin(\omega_i t)] C_{0j} \quad (3-41)$$

em que  $t$  é o dia do ano,  $\omega_i = 2\pi i / 365$ ,  $k$  é o número de harmónicos úteis,  $\alpha_{ij}$  e  $\beta_{ij}$  são os coeficientes de Fourier, e  $C_{01}$  é um indicador variável que toma o valor 1 se o tempo está limpo e 0 se o tempo não está limpo, enquanto que  $C_{02}$  toma o valor 1 se o tempo não está limpo e 0 se o tempo está limpo. As estimativas dos mínimos quadrados para estes coeficientes são:

$$\hat{\alpha}_{ij} = \frac{2}{365} \sum_{t=1}^{365} Y_t \cos(\omega_i t) C_{0j} \quad (3-42)$$

$$\hat{\beta}_{ij} = \frac{2}{365} \sum_{t=1}^{365} Y_t \sin(\omega_i t) C_{0j} \quad (3-43)$$

Para determinar o número de harmónicos necessários de modo a obter uma boa adaptação, a abordagem utilizada consiste na soma dos termos seno e coseno separadamente em cada passo e incluir somente o termo com um coeficiente significativo. A decisão do número de termos no modelo é realizada com base no Critério de Informação Akaike (CIA) que é obtido por:

$$CIA = \ln \left[ \frac{1}{n} \sum \hat{X}_t^2 \right] + \frac{2v}{n} \quad (3-44)$$

onde  $n$  é o número de observações,  $v$  é o número total de parâmetros e  $\hat{X}_t = Y_t - \hat{\mu}_t$  é o tempo residual estimado. Para uma comparação entre modelos, o modelo melhor é aquele que tem o CIA mínimo.

Relativamente à componente estocástica esta pode ser modelizada por um modelo temporal linear ou não linear. Quando a série satisfaz as condições de linearidade, então é possível a modelizar utilizando um processo ARMA (média móvel auto-regressiva) que pode ser representada na forma:

$$X_t + \sum_{i=1}^p a_i X_{t-i} = e_t + \sum_{j=1}^q c_j e_{t-j} \quad (3-45)$$

onde os coeficientes  $a_i$  e  $c_j$  são os coeficientes do processo e  $e_t$  é uma sequência de variáveis independentes, de distribuição aleatória normal com média zero e variância comum  $\sigma_e^2$ . As constantes não aleatórias  $p$  e  $q$  são respectivamente, as ordens auto-regressiva (AR) e média móvel (MA) do modelo, onde a escolha da ordem é determinada pelo exame da significância dos coeficientes MA e AR e o critério MSE ou CIA.

Quando os dados não suportam os pressupostos requeridos pelo uso do processo ARMA, um modelo temporal bilinear é então utilizado. Uma série  $X_t$  é temporal bilinear se satisfazer a seguinte equação:

$$X_t + \sum_{i=1}^p a_i X_{t-i} = e_t + \sum_{j=1}^q c_j e_{t-j} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k b_{ij} X_{t-j} e_{t-i} \quad (3-46)$$

constituindo assim um modelo bilinear BL( $p, q, m, k$ ), onde  $e_t$  é uma sequência de variáveis independentes, de distribuição aleatória normal com média zero e variância comum  $\sigma_e^2$ . Os coeficientes  $a_i$ ,  $c_j$ , e  $b_{ij}$  são constantes não aleatórias e  $p, q, m$ , e  $k$ , são inteiros não negativos conhecidos. Na prática, o modelo que se revelou mais adequado foi o modelo BL( $P, 0, M, K$ ).

Outra modelização da radiação solar é referenciada por Zeroual, Ankrim e Wilkinson [32], e consiste num modelo estocástico. Assim, é referido que a radiação solar é um fenómeno *quasi-periodic*, apesar das séries se repetirem num ciclo anual devido a efeitos sazonais. Analisando uma série de radiação solar referente a dois anos, verifica-se que esta é distribuída à volta de uma componente de tendência periódica com uma duração de um ano.

É conveniente indexar a radiação diária, por dia e ano  $H(d,n)$  em que  $d=1...365$ ,  $n=1...3$ . Assumindo que a radiação diária é não estacionária apenas em momentos de baixa ordem (média, variância e autocovariância), então, esta hipótese sugere que existe a possibilidade de representar os dados como um processo de decomposição clássica:

$$H(d, n) = m(d) + S(d, n) \quad (3-47)$$

em que  $m(d)$  é uma função que representa a componente de tendência ou componente determinística e  $S(d,n)$  é a componente de estocástica que descreve a flutuação de  $H(d,n)$  devido a efeitos de curto prazo do tempo. Este tipo de transformação tende a separar as flutuações diárias das variações sazonais, devido às mudanças anuais cíclicas na declinação solar. Como as

flutuações diárias são sobrepostas às variações sazonais, os modelos periódicos com parâmetros fixos fornecem grandes erros de previsão no curto ou médio prazo. Modelos do tipo ARIMA tendem a ajustar os dados bastante bem e possuem boas propriedades de previsão de curto prazo. Contudo, para previsões de longo prazo, estes modelos fornecem resultados de fraca qualidade, porque não tem em consideração a natureza periódica do fenómeno. Por estas razões a modelização das duas componentes do modelo é efectuada separadamente. A componente  $m(d)$  foi modelizada utilizando uma análise de Fourier, enquanto que a média diária,  $S(d)$ , da série  $D(d,n)$ , obtida a partir da diferença entre a série original  $H(d,n)$  e  $m(d)$ , foi descrita por modelos estocásticos auto-regressivos.

Assim, a componente  $m(d)$  é obtida por:

$$m(d) = A_0 + \sum_{j=1}^K (A_j \cos(\omega_j d) + B_j \sin(\omega_j d)) \quad (3-48)$$

onde  $\omega_j = 2\pi j/365$ ,  $K$  é o número de harmónicos úteis e  $A_j$  e  $B_j$  são os coeficientes de Fourier calculados para um dado número de harmónicos por:

$$A_j = \frac{2}{365} \sum_{d=1}^{365} m(d) \cos(\omega_j d) \quad (3-49)$$

e

$$B_j = \frac{2}{365} \sum_{d=1}^{365} m(d) \sin(\omega_j d) \quad (3-50)$$

Para ajustar os dados utilizando o modelo anterior, é utilizada a estimativa não tendenciosa definida por:

$$\hat{m}(d) = \frac{1}{3} \sum_{n=1}^3 H(d, n) \quad (3-51)$$

que é a estimativa da média da radiação diária e representa o efeito sazonal nos dados empíricos  $H(d,n)$ .

Para determinar o número de harmónicos necessários para obter um bom ajuste, é utilizado o teste de Fisher.

A modelização da componente estocástica é obtida através de:

$$S(d) = \hat{m}(d) - m(d) \quad (3-52)$$

As séries temporais dos dados transformados  $D(d)$ , depois de removida a periodicidade anual, não é estacionária porque a dependência em relação ao tempo da radiação solar ainda existe. A distribuição de frequência da componente estocástica  $S(d)$  não é gaussiana. Como os modelos estocásticos standard fornecem séries que possuem densidade de probabilidade simétrica, existe assim a necessidade de efectuar uma transformação na componente  $S(d)$  de modo a que a análise das séries temporais estacionárias atinja a distribuição Gaussiana. Um processo estocástico é descrito pela sua função de auto-covariância. A função de auto-covariância no intervalo  $k$  de  $S(d)$ ,  $C(k)$  é definida por:

$$C(k) = \left( \frac{1}{365} \right) \sum_{i=1}^{365-k} (S(d) - S)(S(d-i) - S) \quad (3-53)$$

onde

$$S = \left( \frac{1}{365} \right) \sum_{d=1}^{365} S(d) \quad (3-54)$$

O coeficiente de auto-correlação  $R(k)$  é obtido pela normalização da função de auto-covariância  $C(k)$  em relação ao seu valor no *lag* 0:

$$R(k) = C(k)/C(0) \quad (3-55)$$

Os valores de  $R(k)$  foram calculados para todos os meses, e mostra-se que os resíduos das séries são auto correlacionados. Os coeficientes para um dia,  $R(1)$ , são relativamente elevados para todos os meses, enquanto que os coeficientes para dois dias  $R(2)$  dependem da estação do

ano. Este resultado sugere que o ano possa ser dividido em três períodos de 4 meses: Janeiro – Abril (JA), Maio – Agosto (MA) e Setembro – Dezembro (SD).

Para avaliar a influência desta divisão, foram recalculados os coeficientes de autocorrelação até um *lag* de 10 para estes 3 intervalos. Os resultados permitem concluir que as séries temporais correspondentes ao intervalo JA mostram uma dependência de 2 dias, as correspondentes ao intervalo MA mostram uma dependência de 1 dia, enquanto que a última série apresenta uma dependência de 3 dias. Assume-se que a distribuição de frequência da radiação solar permanece constante para os 4 meses, portanto, a primeira série, JA, pode ser descrita por um processo autoregressivo de segunda ordem AR(2), a segunda, MA, pode ser representada por um processo autoregressivo de primeira ordem AR(1), e a terceira SD, pode ser descrita por um processo autoregressivo de terceira ordem AR(3). As séries temporais S(d) seguem um processo autoregressivo de ordem p se:

$$S(d) = \sum_{i=1}^p a_i S(d-i) + w(d) \quad (3-56)$$

em que  $w(d)$  é um processo puramente aleatório que não é auto correlacionado, e  $a_i$  são coeficientes autoregressivos.

A radiação solar diária média exhibe uma variação sazonal. O aspecto estocástico da radiação solar diária deve-se às nuvens e constituintes atmosféricos (aerossóis, gases, partículas, etc). Três processos são importantes quando a radiação solar atravessa as várias camadas atmosféricas: difusão, absorção e reflexão. De modo, a caracterizar estes fenómenos, isolaram-se estes efeitos, de outros sazonais, definindo a variável adimensional  $k_t(d)$ :

$$k_t(d) = m(d) / H_0(d) \quad (3-57)$$

onde  $H_0(d)$  é a radiação solar diária extraterrestre, e depende fundamentalmente da declinação e da localização geográfica.

Assim, pretende-se desenvolver um modelo estocástico do índice de claridade diária,  $k_t(d)$ , que é uma variável aleatória que varia teoricamente entre 0 e 1.  $k_t(d)$  é uma variável estacionária, porque a sua média e variância exibem uma variação sazonal. Logo, é efectuada

uma transformação preliminar em  $k_t(d)$  de modo a obter uma série temporal estacionária, pelo menos na média, variância e auto-covariância:

$$k(d) = (k_t(d) - k_t) / \sigma_a \quad (3-58)$$

A média diária anual,  $k_t$ , é subtraída do índice de claridade diário,  $k_t(d)$ , e o restante é dividido pelo desvio padrão diário anual,  $\sigma_a$ , de modo a ter a série  $k(d)$  com média zero e variância unitária. Calculando a distribuição de frequência de  $k(d)$  verifica-se, que esta não é Gaussiana, o que é importante na modelização de  $k(d)$  utilizando processos estocásticos. Como conclusão, os resultados mostram que apenas a dependência de 1 dia é significativa. Deste modo, um modelo autoregressivo de primeira ordem:

$$k(d) = ak(d-i) + w(d) \quad (3-59)$$

onde  $a=-0.34$  e  $\text{var}(a)=0.049$  adaptarão  $k(d)$  adequadamente.  $W(d)$  é uma variável aleatória não auto correlacionada de média zero.

No modelo apresentado por Zuhairy e Sayigh [33] os dados necessários terão de se referir a longos períodos, na ordem dos 20 anos, de modo a obter bons resultados. Para tal, é utilizada a seguinte expressão para o cálculo da radiação solar numa superfície horizontal:

$$I = 76.09142 + 242.76 \cos \theta_z + 1024.159 \cos^2 \theta_z - 335.823 \cos^3 \theta_z - \exp\left(\frac{10000}{VIS}\right) \quad (3-60)$$

onde  $I$  é a radiação solar total numa superfície horizontal ( $\text{Wh/m}^2$ ),  $VIS$  é a visibilidade (km),  $\theta_z$  é o ângulo *zenith*.

A equação seguinte pode ser utilizada para obter  $\cos \theta_z$ :

$$\cos \theta_z = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega \quad (3-61)$$

onde  $\phi$  é o ângulo de latitude,  $\delta$  é o ângulo de declinação e  $\omega$  é o ângulo horário.



O ângulo de declinação é calculado por:

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right) \quad (3-62)$$

em que  $n$  é o dia do ano, e o valor de  $\omega$  é obtido por:

$$\omega = 15(hr - a) \quad (3-63)$$

onde  $a$  é uma constante de valor 11.75, em que  $\omega = 0$ ,  $hr$  é a hora solar local. O valor de  $hr$  pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$hr = standard\ time + 4(L_{st} + L_{loc}) + E \quad (3-64)$$

em que  $L_{st}$  é a latitude standard meridional para a zona horária local e  $L_{loc}$  é a longitude do local.

O valor de  $E$  pode ser obtido por:

$$E = 9.87 \sin 2B - 7.53 \cos B - 1.5 \sin B \quad (3-65)$$

onde  $B = 360(n-81)/365$ .

O modelo de simulação de radiação solar foi utilizado para obter a base de dados da radiação solar total horária numa superfície horizontal. Esta base de dados representa os registos horários ao longo de 20 anos.

O facto das condições climáticas variarem de ano para ano, para o mesmo local, leva à necessidade de desenvolver metodologias que simulem as condições climáticas prevalentes no local. Assim, o modelo utilizado consiste num modelo de desenvolvimento anual baseado em dados horários, que são medidos por estações meteorológicas. Os dados deverão referir-se a um período mínimo de 10 anos, no entanto o período óptimo refere-se a 21 anos. A utilização do período de 21 anos deve-se ao facto de que a posição do Sol relativamente à Terra se repete em cada 21 anos, afectando assim os parâmetros climáticos que são prevalentes num dado local.

Os dados do modelo anual são os dados reais, que possuem uma representatividade estatística de todos os dados considerados no período em análise. Isto deve-se ao facto de que, o modelo anual é obtido a partir dos meses para os quais a média e o desvio padrão são os valores mais próximos ao desvio padrão de longo prazo para esse mês. Os passos necessários para realizar este método são os seguintes:

- 1) verificação dos dados meteorológicos de modo a averiguar que não existem inconsistências;
- 2) cálculo da média diária dos valores horários dos dados:

$$\bar{D} = \frac{\sum_{h=1}^{24} h}{24} \quad (3-66)$$

em que  $\bar{D}$  é média diária dos valores horários e  $h$  são os valores horários.

- 3) Fazer a média dos valores diários para obter a média mensal de cada mês do ano:

$$\bar{M} = \frac{\sum_{D=1}^N \bar{D}}{N} \quad (3-67)$$

onde  $\bar{M}$  é média mensal da soma diária para um mês específico de um dado ano,  $N$  é o número de dias do mês em questão.

- 4) Cálculo da variância para cada mês do ano, em todos os anos, comparando as médias diárias com as médias mensais:

$$S^2 = \frac{\sum_{D=1}^N (\bar{D} - \bar{M})^2}{N - 1} \quad (3-68)$$

em que  $S^2$  é a variância. Deste modo, o covariante pode ser calculado como:

$$\lambda = \frac{S}{\overline{M}} \quad (3-69)$$

em que  $\lambda$  é o covariante, que será calculado para todos os meses dos anos em consideração.

- 5) Cálculo da média de cada mês, a partir das médias mensais desse mês, em todo o período:

$$\overline{M}_m = \frac{\sum_1^x \overline{M}}{X} \quad (3-70)$$

onde  $\overline{M}_m$  é média das médias mensais de mês, X é o número de anos.

- 6) De seguida, calcula-se a média das variâncias e dos covariantes para todos os meses do ano:

$$\overline{S} = \frac{\sum_1^x S}{X} \quad (3-71)$$

em que  $\overline{S}$  é média das covariâncias para cada mês e

$$\overline{\lambda} = \frac{\overline{S}}{\overline{H}_m} \quad (3-72)$$

onde  $\overline{\lambda}$  é a média dos covariantes.

- 7) Depois de efectuados estes cálculos, o modelo anual para a radiação solar total horária numa superfície horizontal pode ser estabelecido.

Cada mês é representado pelo mês em que a média e variância são os mais próximos à média e variância de longo prazo para esse mês específico. Isto pode ser obtido por uma simples

comparação dos resultados de  $\lambda$  e  $\bar{\lambda}$  e o mês com o valor mais próximo de  $\lambda$  relativamente à média dos covariantes de longo prazo é seleccionado como o mês representativo de todos os meses no período em estudo. Este mês é utilizado para construir o modelo anual, com outros meses seleccionados da mesma forma.

De seguida, é apresentado um método para efectuar a simulação dos componentes da radiação solar horária em superfícies horizontais e inclinadas.

Bulut [34] apresenta dois métodos para a modelização da radiação solar, um baseado em dados medidos e outro que gera sinteticamente dados que depois serão utilizados na modelização.

Uma base de dados representativa para um ano é conhecida como ano de referência de teste (TRY) ou ano meteorológico típico (TMY). TMY ou TRY consistem dos meses seleccionados a partir de anos individuais e que são concatenados de modo a completarem um ano. Vários métodos têm sido testados, mas a metodologia mais utilizada para a geração de dados típicos meteorológicos é a estatística de Finkelstein-Schafer (FS). De acordo com este método, se um número,  $n$ , de observações de uma variável  $X$  estiverem disponíveis e se forem ordenadas de uma forma crescente  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ , a função de distribuição de frequência acumulada deste variável é obtida pela função  $S_n(X)$  que é definida como se segue:

$$S_n(X) = \begin{cases} 0 & \text{se } X < X_1 \\ (k - 0.5)/n & \text{se } X_k < X < X_{k+1} \\ 1 & \text{se } X > X_n \end{cases} \quad (3-73)$$

O FS através do qual a comparação entre a função de distribuição de frequência acumulada de longo prazo de cada mês e a de cada mês individual do ano foi efectuada, é obtida pela seguinte equação:

$$FS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i \quad (3-74)$$

onde  $\delta_i$  é a diferença absoluta entre a função de distribuição de frequência acumulada de longo prazo do mês e a função de distribuição de frequência acumulada de um ano para o mesmo mês em  $X_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ), sendo  $n$  o número de leituras diárias do mês.

$\delta_i$  e  $F(X_i)$  são expressas através das seguintes expressões:

$$\delta_i = \max\left[|F(X_i) - (i-1)/n|, |F(X_i) - i/n|\right] \quad (3-75)$$

$$F(X_i) = 1 - \exp(-X_i/\bar{X}) \quad (3-76)$$

em que  $X_i$  é uma amostragem de um conjunto de  $n$  observações ordenadas em ordem crescente e  $\bar{X}$  é a média da amostra.

Neste estudo, a função FS foi calculada para cada mês de cada ano do conjunto de dados. O ano representativo para cada mês foi determinado, tendo como base que o ano representativo é o de valor de FS mais reduzido.

Para a simulação da radiação diária global foi desenvolvida uma função trigonométrica de modo a obter os valores medidos. A função possui um único parâmetro: o dia do ano. A radiação solar diária global numa superfície horizontal em  $\text{MJm}^{-2}\text{dia}$  é:

$$I = I_2 + (I_1 - I_2) \left| \sin \left[ \frac{\pi}{356} (d + 5) \right] \right|^{1.5} \quad (3-77)$$

em que  $d$  é o número do dia começando a 1 de Janeiro. Para o 1 de Janeiro  $d=1$ , e para 31 de Dezembro  $d=365$ .  $I_1$  e  $I_2$  são os coeficientes determinados por análise estatística.

O erro médio quadrático é obtido por:

$$RMSE = \left( \frac{\sum_{i=1}^M (CV_i - MV_i)^2}{m - m_p} \right)^{1/2} \quad (3-78)$$

onde  $CV$  denota o valor calculado em  $I$ ,  $MV$  refere-se ao valor medido,  $m$  é o número de valores e  $m_p$  é o número de parâmetros no modelo utilizado. Neste caso, o valor utilizado é 2.

O erro absoluto (AE) é calculado por:

$$AE = |CV - MV| \quad (3-79)$$

O erro relativo (RE) é obtido por:

$$RE = \frac{CV - MV}{MV} \quad (3-80)$$

O coeficiente de correlação r:

$$r = \sqrt{\frac{S_t - S_r}{S_r}} \quad (3-81)$$

em que  $S_r$  e  $S_t$  são definidos do seguinte modo:

$$S_r = \sum_{i=1}^m (MV_i - CV_i)^2 \quad (3-82)$$

$$S_r = \sum_{i=1}^m (MMV - MV_i)^2 \quad (3-83)$$

em que MMV é a média dos valores medidos (MV) e é obtida por:

$$MMV = \frac{\sum_{i=1}^m MV_i}{m} \quad (3-84)$$

É depois efectuada uma comparação entre os valores medidos e os valores gerados por este modelo e verifica-se, que tal como nos valores medidos, os valores gerados apresentam uma

variação ampla e uma certa aleatoriedade. Os valores médios da radiação solar obtida por I apresentam uma consistência assinalável em bases mensais.

Celik [35] no seu artigo faz um levantamento das várias técnicas que existem para modelação da radiação solar e velocidade do vento. Assim, são identificados quatro métodos para a geração de dados:

- radiação solar diária obtida a partir de dados de longo prazo (LTD) através do algoritmo ESRA da Comissão Europeia, enquadrado no projecto Europeu de Radiação Solar ATLAS;
- média diária mensal (AVG);
- anos teste de referência (TRY);
- sequência temporal artificial aleatória anual (GEN).

Para o AVG, cada dia é idêntico ao seguinte e os valores médios horários de radiação supostamente são os mesmos. O índice TRY é semelhante ao TMY apresentado por Bulut. O TRY é utilizado na Europa, enquanto que o TMY é principalmente utilizado nos EUA. Estes quatro métodos foram testados para vários tipos de sistemas (fotovoltaico, passivo e aquecimento de água) utilizando dados relativos a duas localizações na Europa, Uccle (Bélgica) e Carpentras (França). Os resultados obtidos permitem concluir que o ESRA, GEN e TRY dão resultados satisfatórios em termos de produção de energia. Contudo o perfil obtido pelo AVG não é satisfatório.

Outros tipos de dados sintéticos meteorológicos são os dados meteorológicos comprimidos (COM). O COM tenta representar as estatísticas importantes de um mês com N dias seleccionados, em que N é um número inferior ao número de dias de um mês. Assim, a principal questão relacionado com este método prende-se com o número de dias a seleccionar. É claro, que à medida que o número de dias diminui, a precisão do COM será diferente. Este assunto tornou-se objecto de estudo por parte de alguns investigadores, e chegaram a conclusão que o número de dias a utilizar deveria ser quatro.

Com estes elementos, o autor gerou dois conjuntos diferentes de dados: um relativo a 3 dias e outro relativo a 4 dias que representam o mês, resultando assim num total de 36 e 48 dias por ano respectivamente. Os valores horários de radiação solar são gerados a partir do valor do índice de claridade mensal.

Assim, este método consiste na estimação horária da variação da radiação solar a partir de dados médios mensais. Os dados de radiação solar horária são gerados em dois passos. No primeiro, os valores diários médios de radiação solar são obtidos a partir da distribuição de claridade (clearness) diária. A distribuição de claridade diária pode ser obtida através dos valores medidos em cada hora, ou a partir das funções de distribuição acumuladas  $K_t$  propostas por Bendt et al; e Hollands e Huget. Conhecendo  $K_t'$  para um dado mês,  $N$  dias (3 e 4) são seleccionados da curva de distribuição de frequência acumulada ou são calculados utilizando as funções propostas por Bendt et al; e Hollands e Huget. Cada dia teria então um  $K_t$ , com a condição que a média nos  $nK_t$  valores seja igual a  $K_t'$ .

A parte mais difícil deste método é obter os valores de claridade diária a partir da curva de frequência acumulada. É um processo complexo e de grande tempo de cálculo.

O segundo passo consiste em gerar os dados de radiação solar a partir dos valores de claridade diária. As equações seguintes desenvolvidas por Collares Pereira e Rabl [36] representam as curvas que permitem gerar os dados horários de radiação solar:

$$r_t = \frac{I}{H} = \frac{\pi}{24} (a + b \cos \omega) \left[ \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - (\pi \omega_s / 180) \cos \omega_s} \right] \quad (3-85)$$

onde:

$$a = 0.409 + 0.501 \sin(\omega_s - 60) \quad (3-86)$$

$$b = 0.6609 + 0.4764 \sin(\omega_s - 60) \quad (3-87)$$

$$I = r_t H = r_t K_t H_0 \quad (3-88)$$

Aqui  $r_t$  é o rácio da radiação horária total ( $I$ ) pela radiação total diária ( $H$ ), e é obtida como uma função da hora em graus ( $\omega$ ) e o ângulo da hora solar ( $\omega_s$ ). Finalmente  $I$  refere-se ao cálculo da radiação horizontal total numa hora. Os valores horários de radiação horizontal total para cada valor diário de  $K_t$  são determinados utilizando a equação que calcula  $r_t$ .

Relativamente à produção de energia deste tipo de produções existem várias formas de determinar. Assim, em [37] a produção é determinada recorrendo a Sistemas de Informação Geográfica em que a expressão que serve de base ao cálculo da energia produzida é a seguinte:



$$EAU = RG.\eta_{STC}.A.FP \quad (3-89)$$

em que:

- EAU: é a energia anual utilizada;
- RG: radiação global por ano;
- $\eta_{STC}$ : rendimento do painel em Standard Test Conditions, ou seja temperatura de 25 °C, e radiação global de 1000 W/m<sup>2</sup>;
- A: área do painel;
- FP: factor de performance.

Como se pode verificar, os valores da energia a produzir são referentes à produção anual. No entanto, é possível referir a produção a outros horizontes temporais, desde que se faça a respectiva conversão dos valores anuais da radiação global, para valores mensais.

O rendimento do painel representa a eficiência do sistema fotovoltaico em que se considera que toda a energia produzida pelo sistema é consumida, não se considerando assim perdas nas baterias, reguladores, inversores, etc. O Factor de Performance do sistema, representa a valor percentual que relaciona o afastamento em relação às condições óptimas de funcionamento, i.e., é a razão entre a energia produzida e a energia consumida.

Já em [38] uma estimativa da energia produzida pode ser obtida através de:

$$E = \eta_{inv} \sum_{i=1}^n P_{\max}(G, T)_i \Delta t_i \quad (3-90)$$

onde:

- E: é a energia produzida;
- n: é o número de períodos considerado;
- $\eta_{inv}$ : é o rendimento do MTTP e do inversor;
- $\Delta t$ : é o período de tempo considerado;
- $P_{\max}(G, T)$ : é a potência máxima do módulo em função da radiação solar incidente, G, e da temperatura da célula no intervalo de tempo considerado.

Como se pode verificar esta expressão distingue-se do anterior já que considera a produção por intervalos de tempo e considera ainda como factor de influência a temperatura. De facto, a temperatura que as células fotovoltaicas atingem, quando expostas à radiação solar, influencia a potência produzida pelas mesmas. Na Figura 3-3 apresenta-se um exemplo dessa situação:

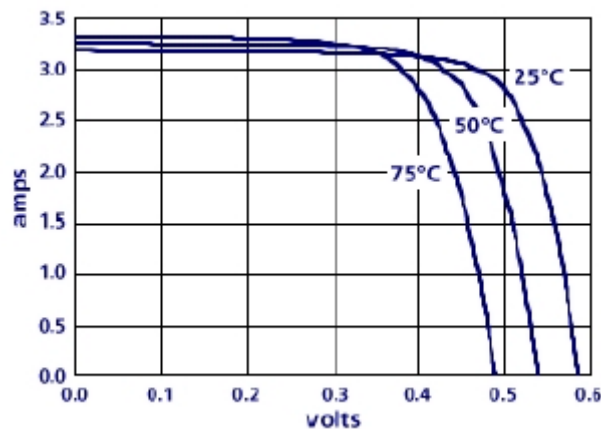


Figura 3-3 - Variação da curva I-V com a temperatura

Como se pode verificar à medida que a temperatura aumenta, a potência produzida diminui, principalmente devido à diminuição da tensão, ao passo que a intensidade praticamente não vê alterado o seu valor.

Uma forma expedita de determinar a produção de energia passa pela consideração de valores médios mensais, como por exemplo, considerar  $n$  igual a 12,  $\Delta t_i$  é o número de horas do mês  $i$ , e  $P_{\max}(G, T)_i$  é o valor média da potência no mês  $i$ .

Outra expressão referenciada em [39] é definida da seguinte forma:

$$E = \eta_m \cdot A \cdot P_f \cdot \eta_{PC} \cdot I \quad (3-91)$$

neste caso as variáveis assumem o seguinte significado:

- $E$ : é a energia mensal produzida em kWh;
- $A$ : é a área ocupada pelos painéis fotovoltaicos;
- $\eta_m$ : é o rendimento dos módulos;

- $P_f$ : é o *packing factor*, ou seja, é a relação entre a área ocupada pelos painéis fotovoltaicos relativamente à área total disponível para a montagem do sistema solar fotovoltaico. O valor típico referenciado é de 0.9;
- $\eta_{PC}$ : é o rendimento do inversor;
- $I$ : média mensal da radiação solar em kWh/m<sup>2</sup>

Em todas estas expressões de determinação da energia produzida, encontram-se os factores de influência principais deste tipo de produção, ou seja, a radiação solar, o rendimento das instalações (quer dos módulos, quer dos inversores) e a área ocupada pelos painéis fotovoltaicos. O horizonte temporal da produção pode ser qualquer um, desde que os valores sejam referidos ao mesmo horizonte.

### **3.8 Biomassa**

Biomassa é um termo utilizado para designar uma série de materiais orgânicos como árvores, plantas, resíduos agrícolas, resíduos sólidos urbanos que podem ser queimados directamente, ou transformados em outros elementos capazes de serem utilizados como combustíveis, como etanol, metanol, biogás, carvão vegetal, óleos [40].

A biomassa utilizável pode dividir-se em três tipos, consoante a sua origem:

- Biomassa Florestal – de que fazem parte: restos de madeira provenientes da indústria, lenha, resíduos florestais provenientes da limpeza das florestas;
- Biomassa Agrícola – de que fazem parte: palha, estrume, casca de arroz, bagaço de azeitona, restos de culturas (como por exemplo: trigo, milho, cana-de-açúcar, girassol);
- Resíduos Urbanos – de que fazem parte: lixos domésticos, como papel, plásticos, cartão, tecidos e os efluentes industriais (designadamente do sector agro-alimentar).

Tendo em conta o tipo de transformação energética da biomassa esta é dividida de acordo com uma terminologia mais específica, com diferentes conotações em função das diferentes utilizações: aquecimento, transporte ou produção de energia. Em geral, a tendência é para utilizar

o termo *bioenergia* para sistemas de biomassa que produzem calor e/ou electricidade, e biocombustíveis para os transportes. A bioenergia também pode ser utilizada para o arrefecimento utilizando *chillers* que possuem o seu princípio de funcionamento idêntico aos refrigeradores.

Relativamente aos biocombustíveis a Comissão Europeia emitiu a Directiva 2003/30/CE [41] que se refere à promoção da sua utilização ou de outros combustíveis renováveis nos transportes. Segundo esta directiva, entende-se por biocombustível, o combustível líquido ou gasoso para transportes, produzido a partir de uma fracção biodegradável de produtos e resíduos provenientes da agricultura, da silvicultura e das indústrias conexas, bem como a fracção biodegradável dos resíduos urbanos e industriais (biomassa).

De acordo com a Directiva, os Estados-Membros deverão assegurar que seja utilizada uma proporção mínima de biocombustíveis e de outros combustíveis renováveis, que será de 2% de toda a gasolina e de todo o gasóleo utilizados para efeitos de transporte, colocados no mercado até 31 de Dezembro de 2005 e de 5,75% até 2010. Isso implicará uma necessidade de 220 milhões de litros em 2005, crescendo para 690 milhões em 2010.

Segundo os especialistas, a gasolina aditivada com bioetanol ou seus derivados, ou em substituição do metanol, não carece de qualquer modificação dos motores dos automóveis e demais meios de transportes. As emissões gasosas resultantes da combustão no motor serão mais limpas, reduzindo-se assim a poluição.

A quantidade de biocombustíveis a produzir depende, portanto, dos consumos futuros de gasolina e gasóleo. A estimativa é a seguinte:

**Tabela 3-1 - Consumo previsto de combustíveis em Portugal (Milhares de Litros)**

	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>
Total de gasolina (sem aviação)	2.843.670	2.869.263	2.895.086	2.921.142	2.947.432	2.973.959
Biocombustível (etanol) necessário para atingir as metas propostas	85.852	119.109	152.957	187.405	222.461	258.133
Total de gasóleo	6.076.197	6.203.797	6.334.077	6.467.092	6.602.901	6.741.562
Biocombustível (biodiesel) necessário para atingir as metas propostas	134.943	189.443	246.173	305.202	366.601	430.445

### 3.8.1 Tecnologias

A biomassa surge-nos nas mais variadas formas podendo ser convertida em combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos. Geralmente a lenha é cortada em pedaços ou em lascas para um melhor manuseamento ou então é convertida em briquetes. A biomassa poderá também ser pirolisada ou gasificada de modo a ser convertida na forma líquida ou gasosa. Todas as formas de biomassa podem ser convertidas para criar calor (como água quente ou vapor) ou para produzir electricidade ou ambas numa instalação de cogeração.

Existe um interesse crescente na utilização de *biofuels* para o sector dos transportes, em que o número de veículos movidos a álcool ou a biodiesel tem crescido em todo o mundo.

Muitos acreditam que o hidrogénio utilizado em pilhas de combustível será o último método limpo de transporte, já que utilizando este combustível os resíduos produzidos reduzem-se praticamente a vapor de água. A biomassa poderá desempenhar um papel importante a longo prazo permitindo a produção directa de hidrogénio, directamente a partir de processo biológico ou fornecendo energia sustentável para outros métodos de produção (por exemplo, a electrolise).

### 3.8.2 Combustão directa

A combustão directa é a forma mais comum de converter a biomassa em energia, calor ou electricidade, e actualmente é responsável por 90% de energia produzida a partir de biomassa. É uma tecnologia relativamente simples, disponível comercialmente e pode ser encarada como uma tecnologia de créditos firmados. Comparada com as outras tecnologias (gasificação e pirólise) é a mais simples e a mais evoluída.

As modernas centrais de combustão industrial estão equipadas com sistemas de controlo totalmente automáticas, o que elimina os custos relativamente elevados com pessoal, bem como resulta num nível inferior de emissões. As tecnologias de combustão directa são:

- leito fixo de combustão
- leito fluidizado de combustão
- combustão por poeiras

O desejo de queimar combustíveis fora do comum melhoram a eficiência, reduzem custos e diminuem os níveis de emissões o que leva a que novas tecnologias sejam desenvolvidas. Para um maior desenvolvimento da combustão da biomassa, a tecnologia de combustão deverá ser otimizada para a manter competitiva à medida que a gasificação e a pirólise se desenvolvem. A queima de biomassa com carvão em caldeiras representa uma combinação da energia renovável e fóssil o que permite obter os benefícios dos dois tipos de combustível.

### **3.8.3 Gasificação**

Como a combustão directa, a gasificação é um processo de conversão termo-químico de elevada temperatura, mas neste caso o resultado esperado consiste na produção de um gás combustível, em vez de calor. Para tal, é efectuada uma combustão parcial da biomassa com um fornecimento restrito de ar ou oxigénio, usualmente numa elevada temperatura ambiente de 1200-1400 °C. O produto da gasificação pode. Após tratamento adequado, ser queimada directamente para o fornecimento de calor, ou pode ser utilizada para accionar turbinas a gás ou motores para produzir energia ou trabalho mecânico.

A produção de electricidade a partir da gasificação é um processo mais complexo do que utilizando a combustão directa, que resulta em custos de investimento mais elevados. Contudo a vantagem da gasificação consiste em permitir obter eficiências consideravelmente superiores: a maior parte das centrais de combustão de pequena ou média dimensão possuem eficiências na ordem dos 15 – 20%, enquanto que as de gasificação alcançam eficiências na ordem dos 35%, com a possibilidade de no curto prazo atingirem os 45 – 50%. Como uma tentativa de melhorar ainda mais a eficiência, as turbinas a gás podem ser integradas com uma turbina a vapor, em que neste caso estaremos na presença de um sistema de ciclo combinado integrado de gasificação de biomassa. De recordar que sistemas mais eficientes representam sistemas com níveis inferiores de emissões.

Os principais tipos de sistemas gasificadores são os seguintes:

- updraft;
- downdraft;
- leito fluidizado.

### **3.8.4 Pirólise**

A pirólise consiste na decomposição térmica que ocorre na ausência de oxigénio, e é também o primeiro passo nos processos de combustão e gasificação, sendo seguida pela oxidação total ou parcial dos produtos primários. O objectivo da pirólise consiste na produção de um combustível líquido, denominado de bio-óleo ou óleo de pirólise, que pode ser utilizado como combustível para aquecimento ou produção de energia. O principal benefício do processo de pirólise, quando comparada com a combustão ou gasificação, é que o combustível na forma líquida é mais fácil de transportar do que combustíveis sólidos ou gasosos. Isto significa também que a central não necessita de estar próxima do ponto de utilização do bio-combustível, mas pode estar localizada perto do ponto de recolha da biomassa, o que resulta numa diminuição considerável dos custos de transporte. Elevados custos de transporte são um dos factores de limitação para a construção de centrais de biomassa de grande dimensão.

A pirólise, em comparação com a combustão e gasificação, está num estado inicial de desenvolvimento, pelo que os seus custos de desenvolvimento são ainda muito elevados e ainda muito instáveis, mas isto significa também que existe uma margem considerável para a redução de custos. As tendências actuais na investigação e desenvolvimento da pirólise estão centradas na denominada pirólise rápida.

## **3.9 Conclusões**

O objectivo deste capítulo é o de efectuar um levantamento do estado da arte relativamente às várias formas de energia renovável. Assim, efectuou-se um estudo das várias tecnologias existentes actualmente, ou seja, a eólica, a solar fotovoltaica, solar térmica e a biomassa. Paralelamente efectuou-se um estudo relativamente à modelização efectuada para os sistemas eólico e solar fotovoltaica, ao nível do recurso e tecnologia.

Através da análise efectuada para os sistemas eólicos, foi possível identificar como factores de influência a localização do parque eólico, nomeadamente a orografia do terreno e a presença de obstáculos, o tipo de turbinas a utilizar e a disposição das turbinas no parque. Foram também apontados outros factores como a densidade do ar, que depende das condições de pressão e temperatura, mas que normalmente são desprezáveis. Relativamente à caracterização do local, esta pode ser efectuada através de modelos atmosféricos mesoescala para efectuar a

previsão e o mapeamento do recurso eólico respectivo, ou ainda através do recurso a sistemas de informação geográfica.

Quando os valores da velocidade do vento são recolhidos, e de modo a obter uma caracterização do potencial em estudo, é necessário proceder à sua transposição para a altura a que estará o hub da turbina que se pretende instalar. Para tal, ilustraram-se várias formas de efectuar este procedimento, recorrendo de uma forma geral a expressões logarítmicas.

A representação mais comum do vento é efectuada através de distribuições de probabilidade, mais concretamente recorrendo a distribuições de Weibull. Neste caso, é necessário definir os parâmetros que caracterizam este tipo de distribuição, ou seja, o parâmetro de escala,  $c$ , e o parâmetro de forma,  $k$ . Outra forma de representação passa pela utilização da distribuição de Rayleigh, que não é mais que uma simplificação da distribuição de Weibull, onde apenas se define o parâmetro de escala.

Para o funcionamento das turbinas eólicas é necessário definir três valores de velocidade do vento. São eles a velocidade mínima para que a turbina funcione ( $v_{in}$ ), a velocidade que leva a que a turbina se desligue ( $v_{out}$ ) e velocidade que leva a turbina a produzir a sua potência nominal ( $v_n$ ).

A modelização da produção de um parque eólico pode ser efectuada através de vários métodos. Um desses métodos passa pelo recurso a modelos de fiabilidade em que são considerados os estados de avaria e tempos médios de reparação e assim determinar a disponibilidade do parque eólico. Outros passam pela obtenção do valor médio de produção horária em função da velocidade do vento no local. Outra forma de modelização passa pela consideração de modelos de Markov, considerando as distribuições de probabilidade discreta dos níveis de capacidade de um determinado número de turbinas. Quando são utilizadas turbinas diferentes, as distribuições de probabilidade são obtidas por convolução das várias distribuições utilizando para tal um algoritmo recursivo. A modelização do parque é obtida pela combinação das distribuições de probabilidade dos níveis de capacidade das turbinas eólicas devido a avarias em várias velocidade do vento.

Foi também referenciada a modelização de sistemas diesel quando associados a sistemas eólicos. Mais uma vez, recorre-se a sistemas de Markov e utilizando as respectivas distribuições de probabilidade.

Relativamente aos sistemas solares procedeu-se à sua classificação em sistemas fotovoltaicos e térmicos. Para ambos foi efectuada uma descrição dos vários tipos de tecnologia existentes, bem como dos componentes necessários à sua instalação.



Deste modo, para os sistemas fotovoltaicos identificaram-se como factores de influência da sua produção, os níveis de radiação solar disponíveis no local de implementação da instalação, o tipo de células fotovoltaicas utilizado, já que os níveis de eficiência variam em função da tecnologia e material utilizado no seu fabrico; o rendimento dos componentes que compõem os sistemas fotovoltaicos, como inversores, baterias e reguladores. Relativamente ao recurso natural, a radiação solar global, para efectuar uma caracterização do seu potencial num dado local é necessário que os valores medidos correspondam a períodos de 20 anos. A radiação solar é influenciada por humidade relativa do ar, temperatura, latitude, altitude e a poluição atmosférica.

Na ausência de medidas da radiação existem vários métodos de simulação que permitem obter estes valores, nomeadamente métodos de regressão linear e modelos estocásticos, que poderão ser de uma precisão maior ou menor, consoante o grau de detalhe incluído. Este detalhe passa pela consideração dos efeitos da poluição atmosférica, condições de humidade e temperatura do ar, a variação sazonal. Com estes métodos será possível obter sinteticamente os valores de radiação solar necessários à caracterização do potencial solar de um dado local. Outra abordagem, passa pela análise de séries temporais. Para utilizar este método é necessário efectuar medidas da radiação solar durante um certo período, se possível no mínimo um ano, e assim é possível efectuar a previsão de uma série temporal a partir da informação recolhida, bem como obter uma visão sobre as inter-relações que se estabelecem entre as variáveis que a definem.

No que diz respeito à determinação da produção de energia por este tipo de centrais, apresentaram-se um conjunto de expressões que permitem o seu cálculo. Nestas expressões encontram-se expressas os factores de influência deste tipo de produção como a radiação solar, o rendimento, a área da instalação e a temperatura das células fotovoltaicas. Os horizontes de produção poderão ser referentes a valores diários, mensais ou anuais consoante o que se pretender calcular.

No que diz respeito, ao solar térmico foram identificados os vários fins que este tipo de produção poderá ser aplicada. De uma forma geral, este tipo de aproveitamento da energia solar é utilizada para aquecimento (térmico ou água) e na produção de energia. De seguida, foram referenciados quais os tipos de colectores que poderão ser utilizados nestes sistemas e efectuada uma descrição das várias soluções. No final, são descritos os principais tipos de sistemas de energia solar térmica, i.e., a circulação em termossifão e a circulação forçada.

Finalmente, para a biomassa foi apresentada a sua definição e classificação de acordo com a origem da matéria combustível a utilizar. Foram também identificadas as principais tecnologias existentes, ou seja, a combustão directa, gasificação e a pirólise.

## 4 Fundamentos de Sistemas Difusos

A introdução das noções de conjuntos difusos foi da responsabilidade de Lofti Zadeh [42], e consistiu, em linhas gerais, na extensão de conceitos existentes relativos a conjuntos crespos. A teoria dos conjuntos difusos baseia-se na teoria da lógica difusa. Na aproximação clássica, uma declaração só pode ser verdadeira ou falsa, assumindo portanto os valores de um ou zero, respectivamente. Contudo, quando se trata da lógica difusa o verdadeiro valor atribuído a qualquer afirmação pode variar entre dois extremos, tendo assim como valor subjacente uma lógica multivalorizada [43]. Por exemplo, dada uma declaração  $P$ , pode ser afirmado que tem como verdadeiro valor de  $p$ , que pode ser modificada, da mesma forma como na teoria tradicional, pelos operadores comuns como NOT, AND, OR, Implica, etc.

A lógica difusa pode representar uma forma de incerteza e permite tratar as características qualitativas de um objecto, que podem ser vagas ou imprecisas, por exemplo: alto, baixo, caro, etc. Algumas das suas aplicações mais comuns e de maior êxito dizem respeito a problemas de decisão e controlo onde julgamentos e ajustamentos intuitivos e subjectivos estão envolvidos. Por vezes, são comuns os casos em que o sistema sob análise somente pode ser descrito por relações não lineares e muito difíceis de serem modelizadas matematicamente. Nesta área, a lógica difusa prova ser uma ferramenta importante, obtendo resultados satisfatórios.

Neste capítulo apresenta-se uma revisão dos conceitos fundamentais da lógica difusa, bem como da estrutura e aspectos essenciais de projectos de sistemas difusos que mais tarde serão necessários à compreensão dos modelos a desenvolver, sem no entanto entrar em grandes detalhes. Para tal sugere-se a consulta dos seguintes elementos, [44], [45], [46] e [47]

### 4.1 Conceitos básicos

A noção básica de sistemas difusos é que valores verdadeiros (na lógica difusa) ou funções de pertença (em conjuntos difusos) são indicados por um valor no conjunto  $[0.0, 1.0]$ , com 0.0 a representar Falso e 1.0 a representar Verdade. Por exemplo, considere-se a seguinte afirmação:

“A Carla é baixa”

Se a altura da Carla é 1.50 m, pode-se atribuir a esta afirmação um valor de verdade de 0.80. A declaração pode ser traduzida na terminologia de conjuntos na seguinte forma:

“A Carla é um membro do conjunto das pessoas baixas”

Ou será representada simbolicamente com conjuntos difusos como:

$$\mu_x(\text{Carla})=0.80$$

onde  $\mu_x$  é a função de pertença, operando neste caso no conjunto difuso de pessoas baixas, que devolve um valor entre 0.0 e 1.0.

Neste momento é importante denotar a diferença entre sistemas difusos e probabilidade. Recordar-se que probabilidade [48] pode ser definida como a possibilidade de um dado evento ocorrer. Por exemplo, ao lançar uma moeda dir-se-ia que a probabilidade de sair cara é 0.5. Porém, isto não significa que se a moeda fosse lançada duas vezes, numa delas sairia cara. No entanto, significa que se a moeda fosse lançada um número grande de vezes, a proporção correspondente a cara corresponderia a um valor muito próximo de 0.5.

Assim, sistemas difusos e probabilidades operam sob a mesma variação numérica, e à primeira vista ambos possuem valores similares. No caso de um sistema difuso 0.0 representa não pertença e 1.0 representa pertença, enquanto que em probabilidade 0.0 representa um evento que nunca irá ocorrer e 1.0 significa que um evento irá sempre ocorrer. Contudo, existe uma distinção a efectuar entre os dois. A abordagem probabilística assume a declaração, “Existe uma probabilidade de 80% da Carla ser baixa”, esta afirmação resulta do tratamento estatístico da informação disponível relativamente às alturas de uma determinada amostra constituída por seres humanos. A terminologia difusa corresponde a “O grau de pertença de Carla no conjunto de pessoas baixas é de 0.80”. A diferença semântica é significativa: a primeira perspectiva pressupõe que a Carla é ou não baixa, visto que só existe 80% de possibilidade de conhecer a que conjunto pertence. Por outro lado, a terminologia difusa supõe que a Carla é “mais ou menos” baixa, ou outro termo correspondente ao valor de 0.80.

## 4.2 Teoria dos conjuntos difusos

O conceito subjacente a um conjunto difuso é bastante simples, e intuitivamente apelativo para a modelização de situações reais e de problemas. As vantagens da utilização de conjuntos difusos são enormemente amplificadas quando alguém tenta imitar a forma como um humano toma decisões [43]. Por exemplo, se uma pessoa tem de tomar uma decisão relativamente a uma compra, muito provavelmente irá traduzir as variáveis numéricas presentes numa escala qualitativa, como caro, suportável, etc, opera-os neste ambiente e finalmente toma uma decisão.

Dado um universo de discurso  $X$  e um subconjunto  $S \subseteq X$ , um elemento  $x \in X$  pode pertencer parcialmente a  $S$ . Isto é equivalente a afirmar que a fronteira de  $S$  não é exacta, assegurando portanto diferentes graus de pertença de  $x$  em  $S$ . Mais especificamente,  $S$  pode ser associado a uma função característica que mapeia qualquer elemento  $x \in X$  num intervalo  $[0, 1]$ , ou seja:

$$\mu_S : X \rightarrow [0, 1] \quad (4-1)$$

Então, um conjunto difuso  $S$  é descrito por um conjunto de pares ordenados  $\{x, \mu(x)\}$ , em que  $\mu(x)$  é o grau de pertença do elemento  $x$  no conjunto difuso  $S$  [42]. Quando o universo de discurso  $X$  é a linha real,  $(x)$  pode ser representada por uma forma funcional. Se  $X$  é um conjunto de  $n$  pontos discretos  $x_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $(x_i)$  pode ser expressa por um conjunto de pares:

$$\{\mu_S(x_1)/x_1, \mu_S(x_2)/x_2 \dots \mu_S(x_n)/x_n\} \quad (4-2)$$

que é também uma forma de representação do conjunto difuso  $S$ .

## 4.3 Propriedades dos conjuntos difusos

De seguida, apresentam-se algumas das propriedades dos conjuntos difusos.

- A Altura de um conjunto difuso  $A$ ,  $Alt(A)$  é definida por:

$$Alt(A) = \sup_{x \in X} \mu_A(x) \quad (4-3)$$

- Os conjuntos difusos com uma altura igual a 1 são denominados de normais, e subnormais se inferiores a 1;
- O Núcleo (core na literatura inglesa) de um conjunto difuso é um subconjunto crespo de X:

$$Núcleo(A) = \{x \in X | \mu_A(x) = 1\} \quad (4-4)$$

- O Suporte de um conjunto difuso é também um subconjunto crespo de X:

$$Sup(A) = \{x \in X | \mu_A(x) > 0\} \quad (4-5)$$

- A Largura (width na literatura inglesa) de um conjunto difuso é obtida pela diferença entre o supremo e o ínfimo do suporte:

$$Largura(A) = \sup(Sup(A)) - \inf(Sup(A)) \quad (4-6)$$

- O corte de nível  $\alpha$  de um conjunto difuso é definido por:

$$nivel\alpha(A, \alpha) = \{x \in X | \mu_A(x) \geq \alpha\} \quad (4-7)$$

- Um conjunto difuso é caracterizado como sendo convexo quando:

$$\forall x_1, x_2, x_3 \in X, x_1 \leq x_2 \leq x_3 \rightarrow \mu_A(x_2) \geq \min(\mu_A(x_1), \mu_A(x_3)) \quad (4-8)$$

#### 4.4 Operações básicas com conjuntos difusos

Considerando dois conjuntos difusos A e B definidos como:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) : x \in X\}; \quad (4-9)$$

$$B = \{(x, \mu_B(x)) : x \in X\}; \quad (4-10)$$

é possível efectuar algumas operações [42] que se apresentam na seguinte tabela.

**Tabela 4-1 - Operações com conjuntos difusos**

Operação	Resultado
Reunião: $C = A \cup B$	$\mu_C(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$
Intersecção: $C = A \cap B$	$\mu_C(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$
Complemento: $CA$	$\mu_{CA}(x) = 1 - \mu_A(x)$

#### 4.5 Propriedades dos conjuntos difusos

Existem várias propriedades dos conjuntos clássicos que se poderão aplicar aos conjuntos difusos. Assim, apresentam-se algumas das propriedades que se poderão utilizar com os conjuntos difusos, em que a, b e c são graus de pertença de um elemento  $x \in X$  nos conjuntos difusos A, B e C respectivamente:

- Comutatividade:  $\min(a,b) = \min(b,a)$ ;  $\max(a,b) = \max(b,a)$ ;
- Associatividade:  $\min(\min(a,b),c) = \min(a,\min(b,c)) = \min(a,b,c)$ ;  $\max(\max(a,b),c) = \max(a,\max(b,c)) = \max(a,b,c)$ ;
- Distributividade:  $\max(a, \min(b,c)) = \min(\max(a,b), \max(a,c))$ ;
- Idempotência;
- Leis de De Morgan.

Existem no entanto duas propriedades dos conjuntos clássicos que não se poderão aplicar aos conjuntos difusos, são elas a Lei da Contradição e a Lei do Terceiros Excluído. Como se pode verificar na Figura 4-1 intersecção do conjunto difuso A com o seu complemento não é um conjunto vazio, nem a reunião dos dois conjuntos obtém o universo de discurso.

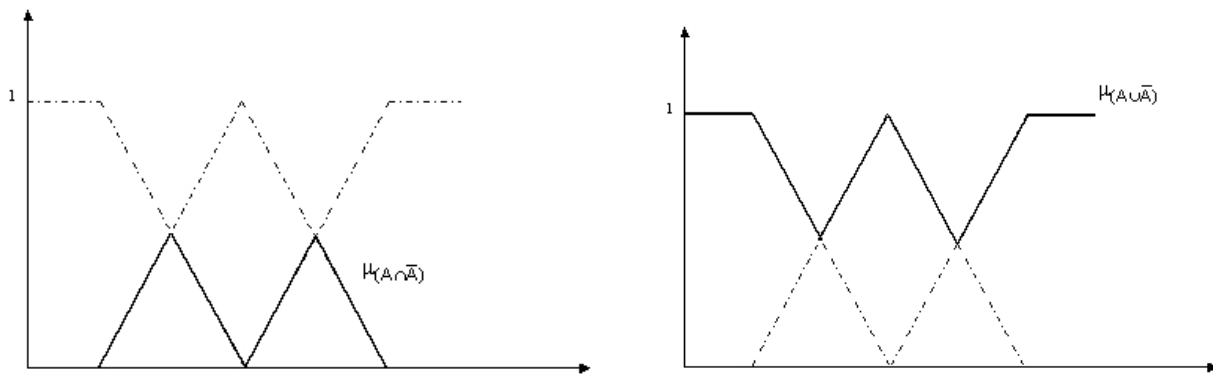


Figura 4-1 - Intersecção e Reunião de dois conjuntos difusos

## 4.6 Princípio da extensão

O princípio da extensão é uma noção fundamental dos conjuntos difusos, visto que serve de base à regra que permite efectuar a associação de elementos de dois ou mais subconjuntos difusos [49], [50].

Supondo que X e Y são conjuntos crespos, A e B são dois conjuntos difusos e f é uma função tal que  $f: X \rightarrow Y$ , e  $f(x) = y$ ,  $x \in X$ ,  $y \in Y$ . Se  $A \subset X$ ,  $f(A)$  é um subconjunto difuso de Y com a propriedade:

$$f(A) = \cup_x \{(\mu_A(x) / f(x))\} \quad (4-11)$$

## 4.7 Forma dos conjuntos difusos



Os conjuntos difusos poderão assumir várias formas, sendo as mais comuns a triangular, trapezoidal e gaussiana, mas no entanto poderão ser definidas outras formas. De seguida apresentam-se as várias formas que os conjuntos difusos podem assumir:

- Triangular: um conjunto difuso triangular é definido como:

$$T(x; a, b, c) = \begin{cases} 0 & ; x < a \\ (x-a)/(b-a); & a \leq x \leq b \\ (c-x)/(c-b); & b \leq x \leq c \\ 0 & ; x > c \end{cases} \quad (4-12)$$

- Trapezoidal: a definição de um conjunto difuso trapezoidal é a seguinte:

$$T(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & ; x < a \\ (x-a)/(b-a); & a \leq x \leq b \\ 1 & ; \\ (d-x)/(d-c); & c \leq x \leq d \\ 0 & \end{cases} \quad (4-13)$$

- Gaussiana: neste caso a definição deste conjunto difuso obriga a que se defina um valor central  $c$ , e um desvio padrão  $\sigma$ . Esta função de pertença também se denomina de função de pertença em forma de sino. Deste modo, vem:

$$\Omega(x; c, \sigma) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (4-14)$$

- Função L: para definir este conjunto difuso basta:

$$L(x; a, b) = \begin{cases} 1 & ; x < a \\ (b-x)/(b-a); & a \leq x \leq b \\ 0 & ; x > b \end{cases} \quad (4-15)$$

- Função  $\Gamma$ : esta função é muito semelhante à anterior, na verdade esta função é simétrica à função  $L$ ;

$$\Gamma(x; a, b) = \begin{cases} 0 & ; x < a \\ (x-a)/(b-a); & a \leq x \leq b \\ 1 & ; x > b \end{cases} \quad (4-16)$$

- Função  $S$ : neste caso a função é semelhante à um  $S$  e a sua representação analítica é a seguinte:

$$S(x; a, b, c) = \begin{cases} 0 & ; x < a \\ 2[(x-a)/(c-a)]^2 & ; a \leq x \leq b \\ 1 - 2[(x-c)/(c-a)]^2; & b \leq x \leq c \\ 1 & ; x > c \end{cases} \quad (4-17)$$

Como se pode verificar através da definição da função trapezoidal, esta pode ser utilizada para definir as funções triangular,  $L$  e  $\Gamma$ .

As funções triangular e trapezoidal destacam-se das restantes pela sua facilidade de implementação e maior eficiência e rapidez quando utilizadas computacionalmente.

## **4.8 Normas Triangulares e Co-normas Triangulares**

Como principais normas tem-se as normas triangulares e as co-normas triangulares. As normas triangulares ou t-normas constituem o mecanismo básico de representação da operação básica de intersecção. Já as co-normas triangulares ou s-normas dizem respeito à operação básica de reunião [51].

$T: [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$  (norma  $T$ )

$S: [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$  (norma  $S$ )

Os operadores min e intersecção são exemplos de t-normas, enquanto que a soma e a reunião são exemplos de s-normas.

Dados  $a$  e  $b$ , duas funções de pertença em diferentes conjuntos difusos, uma norma triangular dever ter as seguintes propriedades:

$$\begin{cases} \text{Comutatividade: } T(a,b) = T(b,a) \\ \text{Associatividade: } T(a, T(b,c)) = T(T(a,b), c) \\ \text{Monotocidade: } T(a,b) \leq T(a,c); \text{ quando } b \leq c \\ T(a, 1) = a \end{cases}$$

Relativamente às s-normas, estas deverão possuir as seguintes características:

$$\begin{cases} \text{Comutatividade: } S(a,b) = S(b,a) \\ \text{Associatividade: } S(a, T(b,c)) = S(T(a,b), c) \\ \text{Monotocidade: } S(a,b) \leq S(a,c); \text{ quando } b \leq c \\ S(a, 1) = a \end{cases}$$

Na Tabela 4-3 apresentam-se outros exemplos de operadores t-norma e s-norma [52], [53]:

**Tabela 4-3 - Outros operadores t-norma e s-norma**

Proposta por Lukasiewicz	$T(a,b) = \max(a+b-1, 0)$	$S(a,b) = \min(a+b, 1)$
Proposta por Zadeh	$T(a,b) = \min(a,b)$	$S(a,b) = \max(a,b)$
Proposta por Bandler	$T(a,b) = a.b$	$S(a,b) = a+b-a.b$

Outro operador muito utilizado é o da função negação ou complemento. Esta função transforma as funções de pertença de um conjunto difuso na função de pertença do complemento desse mesmo conjunto.

$$c[\mu_A(u)] = \mu_{\bar{A}}(u) \quad (4-18)$$

Uma função  $c: [0,1] \rightarrow [0,1]$  é um complemento difuso (c-norma ou negação) se possuir as seguintes características:

$$\begin{cases} \text{Satisfaz as condições de fronteira : } c(0)=1 \text{ e } c(1)=0 \\ c(a) \geq c(b) \text{ se } a \leq b \\ \text{Involução : } c(c(a))=a \end{cases}$$

em que  $a$  e  $b \in [0,1]$ .

## 4.9 Lógica difusa

A lógica difusa tem sido alvo de estudo por vários autores, como por exemplo [54], [55] e [56]. Assim, uma proposição difusa representa uma afirmação como “ $x$  é pesado”, em que pesado é a variável linguística definida pelo conjunto difuso no universo de discurso da variável  $x$ . As proposições difusas ligam variáveis a etiquetas linguísticas definidas para essas variáveis. Proposições difusas podem ser combinadas através da composição de conectores lógicos como *e* ou *ou*.

Os conectores difusos *e* ou *ou* são implementados por t-normas ou s-normas. A escolha de cada norma para o conector lógico depende do significado e contexto das proposições e relações entre elas. Se a proposição relaciona diferentes universos, então estaremos perante uma relação difusa. Considerando a seguinte proposição  $x_1$  é  $A_1$  e  $x_2$  é  $A_2$ , em que  $A_1$  e  $A_2$  possuem funções de pertença  $\mu_{A_1}(x_1)$  e  $\mu_{A_2}(x_2)$ . A relação difusa  $R$  com função de pertença  $\mu_R(x_1, x_2) = T(\mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_2}(x_2))$  pode então representar a proposição  $r$ , em que  $T$  é a t-norma que é utilizada para modelizar o conector *e*.

### 4.9.1 Regras difusas

De modo a raciocinar com lógica difusa, as regras difusas devem ser representadas por uma função implicação. Esta implicação tem a mesma função que a tabela de verdade da implicação clássica. Assim, a implicação  $(A \rightarrow B)$  pode ser encarada como uma representação da declaração *Se A Então B*.

Está-se assim perante uma regra difusa, ou seja uma declaração *Se A Então B*, em que o antecedente e o consequente consistem de proposições difusas. O antecedente poderá ser constituído por uma série de proposições ligadas através dos conectores *e* ou *ou*.

$$\underbrace{\text{Se } x_1 \text{ é } A_1 \text{ e } x_2 \text{ é } A_2}_{\text{Antecedente}}, \underbrace{\text{Então } y \text{ é } B}_{\text{Consequente}}$$

Quando os conjuntos difusos  $A_1$ ,  $A_2$  e  $B$  são identificados pelos graus de pertença  $\mu_{A_1}(x_1)$ ,  $\mu_{A_2}(x_2)$  e  $\mu_B(y)$ , a seguinte relação difusa  $R$ , que representa a regra difusa, pode ser construída:

$$R = I(T(A_1, A_2), B) \quad (4-19)$$

em que  $T$  é a conjunção baseada na t-norma e  $I$  é função difusa de implicação. Assim, o  $T$  representa o *e*, enquanto que  $I$  representa o *Se – Então*. Deste modo, uma regra difusa pode ser representada pela relação difusa com a seguinte função de pertença:

$$\mu_R(x_1, x_2, y) = I(T(\mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_2}(x_2)), \mu_B(y)) \quad (4-20)$$

Quando existe um conjunto de regras difusas é necessário proceder a sua agregação numa única relação difusa.

#### 4.9.2 Raciocínio aproximado

Uma regra difusa pode ser utilizada para inferir conhecimento sobre o consequente da regra utilizando dados, que são subconjuntos difusos do mesmo universo, tal como a premissa da regra.

A inferência de uma única regra difusa é uma aplicação da composição de relações difusas. O principal esquema de inferência introduzido na lógica difusa foi a regra de inferência composicional. Contudo, os esquemas de raciocínio podem ser generalizados a partir da lógica clássica definindo o *modus ponens* e o *modus tollens* generalizados.

Assim, para o *modus ponens generalizado*, esta regra de inferência afirma que duas proposições difusas  $x \text{ é } A$  e  $\text{Se } x \text{ é } A, \text{ Então } y \text{ é } B$ , será possível inferir a proposição  $y \text{ é } B'$  tal que quanto mais próximo  $A'$  estiver de  $A$ , mais próximo estará  $B'$  de  $B$ , com  $A, A', B$  e  $B'$  definidos como conjuntos difusos. Ou seja:

$$\begin{cases} \text{Premissa 1: } x \text{ é } A' \\ \text{Premissa 2: } x \text{ é } A, \text{ Então } y \text{ é } B \\ \text{Conclusão: } y \text{ é } B' \end{cases}$$

No que se refere ao *modus tollens generalizado*, esta regra de inferência afirma que dadas duas proposições difusas  $y \text{ é } B'$  e  $\text{Se } x \text{ é } A, \text{ Então } y \text{ é } B$ , será possível inferir uma nova proposição  $x \text{ é } A'$  tal que quanto maior for a diferença entre  $B'$  e  $B$ , maior será a diferença entre  $A'$  e  $A$ , em que  $A, A', B$  e  $B'$  são conjuntos difusos. Assim vem:

$$\begin{cases} \text{Premissa 1: } y \text{ é } B' \\ \text{Premissa 2: } x \text{ é } A, \text{ Então } y \text{ é } B \\ \text{Conclusão: } x \text{ é } A' \end{cases}$$

A regra de inferência composicional assume que uma regra difusa é representada por uma relação difusa  $R$ . Um resultado  $B'$  poder ser inferido através da composição de  $A'$  e  $R$ :

$$B' = A' \circ R$$

Considerando a definição de composição de relações difusas, a função de pertença para o conjunto difuso  $B'$ , obtido como conclusão, será:

$$\mu_{B'}(y) = \sup_x t[\mu_{A'}(x), \mu_{A \rightarrow B}(x, y)] \quad (4-21)$$

em que  $\mu_{A'}(x)$  é a função de pertença de  $A'$  e  $\mu_{A \rightarrow B}(x, y)$  é a função de pertença relativa à regra que está a ser considerada no processo de inferência. O resultado da inferência será influenciado pelas escolhas a efectuar para o operador t-norma, assim como para a função de implicação.

### 4.9.3 Variável Linguística

O conceito de variável linguística é muito importante na representação do conhecimento num esquema de raciocínio aproximado. De acordo com Zadeh [57] uma variável linguística é uma variável que traduz as palavras ou expressões numa linguagem natural ou artificial. Por exemplo, a *altura* será uma variável linguística, já que toma valores do tipo “*alto*” ou “*baixo*”.

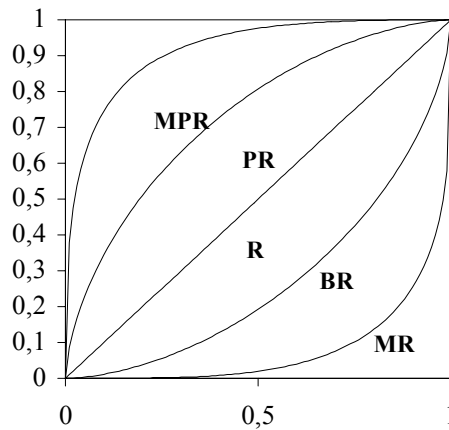
No trabalho desenvolvido em [58] é apresentada a aplicação de variáveis linguísticas à disponibilidade de recursos de energia renovável, nomeadamente recursos hídricos e eólicos.

Assim, no caso dos recursos hídricos a informação a modelizar refere-se à regularidade do caudal e no caso dos recursos eólicos à regularidade do vento, inserindo assim a incerteza subjacente aos mesmos. De facto, estes factores terão impacto na energia produzida pelas unidades respectivas.

A modelização efectuada para a produção mini-hídrica é alterada recorrendo a funções representativas da especificação por peritos de informações adicionais sobre a regularidade do caudal. Essas especificações vão dar origem à construção de funções de graduação ou qualificadores linguísticos cujas funções de pertença se podem ver representadas na Figura 4-2 e cuja representação matemática se descreve na seguinte expressão:

$$f(x) = \left[ 1 - (1 - x^\varphi)^{1/\varphi} \right] \quad (4-22)$$

O conjunto M é composto por cinco variáveis linguísticas cujas funções de pertença se ilustram na Figura 4-2:

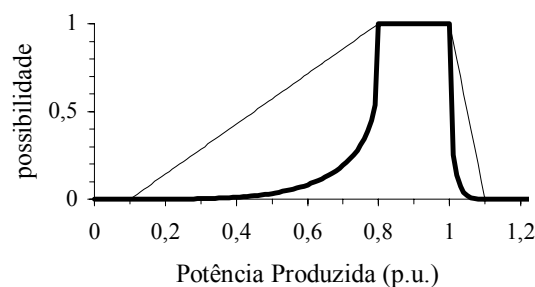


**Figura 4-2 - Qualificadores da regularidade de caudais**

em que:

- MPR: muito pouco regular;
- PR: pouco regular;
- R: regular;
- BR: bastante regular;
- MR: muito regular.

A distribuição de possibilidade final da potência produzida pelas unidades dependentes de energia renovável, após inclusão de todos os dados adicionais da informação, resulta da composição da função apresentada para o caso base cujos modelos foram apresentados em [58] com a função apropriada da Figura 4-2. As regras de composição são as usadas na Teoria dos Conjuntos Imprecisos. Apresenta-se de seguida, um exemplo de aplicação da curva referente à variável linguística MR à curva de imprecisão de produção de centrais mini-hídricas.





**Figura 4-3 - Aplicação da variável linguística**

A traço fino observa-se a modelização assumida para a produção de centrais mini-hídricas com regulação, enquanto que a traço grosso apresenta-se a nova modelização afectada pela variável linguística MR. Visto que o caudal é muito regular a incerteza associada à produção diminui.

## **4.10 Conclusões**

Este capítulo abordou as questões relativas a aspectos fundamentais da teoria dos sistemas difusos, tal como a definição de conjunto difuso e as suas propriedades e operações, bem como aspectos relacionados com a lógica difusa.

Os conjuntos difusos surgiram devido ao facto de os objectos do mundo real muito dificilmente serem classificados de forma binária, ou seja, possuindo ou não determinada característica ou propriedade. De facto, o grau segundo o qual um objecto pertence a uma determinada categoria não deverá ser binário, 0 ou 1, mas sim contínuo no intervalo  $[0;1]$ , surgindo assim a noção de conjunto difuso.

Esta noção é importante porque, servirá de base à modelização das variáveis de entrada dos sistemas de inferência difusa. É assim importante ter noções relativas à forma que os conjuntos difusos poderão assumir, bem como quais o tipo de operações, normas e relações que poderão existir entre eles.

Numa segunda fase foram apresentados aspectos relativos à lógica difusa, nomeadamente as noções de regras difusas, raciocínio aproximado e variáveis linguísticas. Estas noções são importantes para o trabalho desenvolvido nesta tese, devido ao facto de servirem de apoio aos aspectos desenvolvidos no capítulo seguinte, referente à estrutura e projecto de sistemas difusos. De facto aqui é apresentada a estrutura de uma regra, onde são apresentados as noções de antecedente e consequente, bem como o tipo de conectores; para além de variável linguística que permitirá classificar os conjuntos difusos que das regras farão parte.

## 5 Estrutura e Projecto de Sistemas Difusos

Um sistema difuso pode ser encarado como uma função não linear que mapeia e quantifica as relações expressas qualitativamente por um algoritmo difuso. Normalmente os sistemas difusos são utilizados em tarefas de modelização e controlo, constituindo, juntamente com o algoritmo associado, modelos ou controladores de natureza qualitativa.

Um modelo de inferência difusa é constituído pelos seguintes componentes [59]:

- Unidade de fuzzificação;
- Máquina de inferência difusa;
- Base de Regras;
- Base de Dados;
- Unidade de Desfuzzificação.

As variáveis associadas ao sistema de inferência difusa são de dois tipos, as variáveis de entrada e as de saída. Nas variáveis de entrada os valores adquiridos ou enviados ao processo de controlo são normalmente crespos, pelo que terão de passar por um processo de fuzzificação de modo a serem perceptíveis pelo modelo de inferência difusa e representam a eventual incerteza associada às variáveis de entrada. Já as variáveis de saída passarão por um processo oposto, ou seja os valores obtidos na saída do modelo de inferência difusa terão de ser desfuzzificados de modo a serem compreendidos pelo utilizador.

Assim, para que um valor crespo seja fuzzificado é necessário recorrer aos seguintes procedimentos:

- obtenção dos valores crespos das variáveis de entrada;
- mapeamento dos valores crespos das variáveis de entrada no seu universo de discurso correspondente;
- converter os dados mapeados em conjuntos singulares difusos ou converte-los em valores linguísticos apropriados conforme os valores definidos para essa variável.

No processo de desfuzzificação é necessário converter a combinação dos conjuntos difusos obtidos no final do processo de inferência, através de um cálculo pesado, que resulta num valor crespo para a saída.

A base de conhecimento difuso pode conter dois tipos de informação, a base de dados e a base de regras. Na base de dados, encontram-se definidas as funções de pertença dos conjuntos difusos utilizados no controlador definidos para cada variável linguística. Enquanto que a base de regras é constituída por um conjunto de regras que expressam as relações entre as variáveis de entrada e as de saída. Estas regras podem ser expressas da seguinte forma:

Regra j: *Se x é A, então y é B*

Onde x é a variável de entrada, y é a variável de saída. A é um conjunto difuso que corresponde a um dos valores linguísticos que x pode tomar no universo de discurso X, ao passo que B é um dos conjuntos difusos que corresponde a um dos valores linguísticos que y pode tomar no universo de discurso Y.

A base de dados e de regras poderão ser de dois tipos, estáticas ou dinâmicas. Uma base de regras estática apresenta um número fixo e pré-definido de regras, enquanto que uma base de regras dinâmica tem uma capacidade de aprendizagem através da modificação da sua base de conhecimento.

Finalmente o módulo ou máquina de inferência difusa com base nas variáveis de entrada, irá efectuar a avaliação das regras contidas na base de conhecimento, inferindo assim quais as acções de controlo que se devem tomar.

## **5.1 Fuzzificação**

Um fuzzificador é um processo através do qual, um valor do domínio real é mapeado num conjunto difuso. As características que um fuzzificador deverá apresentar são as seguintes [60]:

- levar em consideração que a entrada do sistema é no valor crespo  $x^*$ , o que traduz que o conjunto difuso em  $x^*$  deverá possuir um elevado valor da função de pertença;

- ajudar a suprimir ou minimizar as perturbações que possam afectar os sinais crespos de entrada;
- ajudar a simplificar o cálculo efectuado na máquina de inferência difusa.

Existem na literatura várias estratégias de fuzzificação, entre as quais as estratégias de singulares difusos, de números difusos e de números híbridos difuso/aleatórios [61], [62], [60]. No nosso trabalho a estratégia de fuzzificação a adoptar é de números difusos.

## **5.2 Base de dados**

A função principal da base de dados é armazenar e fornecer a informação necessária ao funcionamento adequado dos módulos de fuzzificação, base de regras e desfuzzificação. A informação que consta da base de dados refere-se à definição do tipo de universo de discurso utilizado, contínuo ou discreto. Para além da natureza contínua ou discreta, o universo de discurso poderá ser normalizado, pelo que será necessário armazenar tanto os domínios físicos das variáveis do sistema, como os seus correspondentes normalizados e respectivos factores de escala. Deste modo, alguns dos aspectos mais importantes na concepção de uma base de dados são [60]:

- Discretização/Normalização do universo de discurso: este aspecto prende-se fundamentalmente com os sistemas de controlo baseados em sistemas informáticos, utilizados para o controlo de sistemas onde o universo de discurso das variáveis consideradas for contínuo. Na normalização, cada segmento do universo de discurso discretizado pode ser mapeado num segmento do universo de discurso normalizado, podendo ser este mapeamento uniforme, não-uniforme ou híbrido;
- Partição dos espaços de entrada e saída: a partição das entradas e saídas linguísticas de um sistema difuso, também designada de quantificação, tem a ver com a definição do número de termos que vão caracterizar estas mesmas variáveis. Esta partição difusa irá definir, para cada variável linguística, o número de termos que a constitui. Ou seja, é determinado o número de conjuntos difusos que definem cada variável linguística. Este número irá determinar até que ponto o controlo obtido

com o controlador difuso é ou não fino. Irá ser também importante para a determinação do número de regras a implementar.

- **Completude:** este aspecto refere-se à capacidade do sistema de inferência difusa poder inferir uma acção de controlo adequada para cada estado do processo controlado. Para tal, usa-se a base de dados, a base de regras ou ambos. Relativamente à base de dados, a completude é obtida se a união dos suportes dos conjuntos difusos em que foi dividida para cada uma das entradas abranger todo o universo de discurso. Em relação à base de regras, a completude é obtida se todas as condições são verificadas, ou seja, se para cada estado do sistema existe uma regra que é accionada, caso contrário a completude não se verificará ocorrendo assim situações para as quais não existem acções de controlo definidas.
- **Definição das funções de pertença:** quanto às funções de pertença dos conjuntos difusos que quantificarão as variáveis de entrada, estas poderão ser mais finas ou grosseiras, consoante o número de partições a adoptar. Por outro lado, é necessário seleccionar a forma das funções de pertença, que poderão assumir qualquer uma das formas mencionadas na secção “*Forma dos conjuntos difusos*”.

### 5.3 Base de regras

A modelização difusa de um sistema requer a sua representação com base num conjunto de regras susceptíveis de o descreverem. Assim, uma base de regras consiste num conjunto de regras *Se-Então* definidas da seguinte forma canónica [62], [63]:

$$R^{(l)} : \text{Se } x_1 \text{ é } A_1^l \text{ e } x_n \text{ é } A_n^l, \text{ Então } y \text{ é } B^l$$

em que  $A_i^l$  e  $B^l$  são conjuntos difusos em  $U_i \subset R$  e  $V \subset R$ , respectivamente e sendo  $x = (x_1, x_2, x_3 \dots x_n)^T \in U$  e  $y \in V$  as entradas e saídas linguísticas do sistema difuso. Tal como na definição da base de dados, existem uma série de aspectos que deverão ser levados em consideração na definição de regras e que deverão ser alvo de uma atenção especial por parte de quem as define. São elas:

- **Completude:** este aspecto já foi referenciado na definição da base de dados, e tal como foi referido é necessário assegurar para qualquer estado do sistema de que existe pelo menos uma regra que é accionada;
- **Consistência:** um sistema diz-se consistente se não existirem regras com o mesmo antecedente e consequentes diferentes, ou seja, se não existirem regras em conflito.
- **Continuidade:** este aspecto refere-se à existência de variações bruscas à saída do controlador. Um conjunto de regras será contínuo se não existirem regras próximas, cujos conjuntos difusos do consequente não formam um conjunto vazio quando intersectados.

Nos sistemas difusos é possível distinguir dois tipos de regras, são elas as regras do tipo Mamdani e do tipo Takagi-Sugeno [64], [65]. As regras do tipo Mamdani possuem o antecedente e consequente das regras consistem em assumpções do tipo difuso. Assim, as regras do tipo Mamdani são da seguinte forma genérica:

$$\text{Se } x_1 \text{ é } A_1 \text{ e } \dots x_n \text{ é } A_n, \text{ Então } y_1 \text{ é } B_1, \dots, y_n \text{ é } B_n$$

Por norma, nas regras do tipo Mamdani, é utilizada o método de inferência max-min, com o operador min utilizado para a conjunção e implicação e o operador max para a agregação.

Nas regras do tipo Takagi-Sugeno o antecedente é difuso, enquanto que o consequente é representado por funções lineares das entradas do sistema difuso. A forma genérica deste tipo de regras é a seguinte:

$$\text{Se } x_1 \text{ é } A_1 \text{ e } \dots x_n \text{ é } A_n, \text{ Então } y = f(x_1, \dots, x_n)$$

## **5.4 Máquina de inferência difusa**

A função da máquina de inferência difusa é determinar o valor difuso de saída, com base nos parâmetros estabelecidos nos módulos de fuzzificação e base de conhecimento. Neste sentido, existem duas abordagens empregue no mecanismo de inferência de um sistema difuso, são elas a inferência composta, ou inferência baseada na composição de regras, e a inferência baseada na avaliação individual de regras.

Na inferência baseada na composição de regras, todas as regras são combinada numa única relação difusa, a qual passa a ser interpretada como uma única regra *Se-Então*. Enquanto que na inferência difusa baseada na avaliação individual de regras, cada regra dá origem a uma saída difusa, sendo a saída do sistema uma composição das várias saídas individuais. É esta última, a máquina de inferência difusa mais utilizada e referenciada na literatura, pelo que passaremos a explicá-la de uma forma mais detalhada.

#### 5.4.1 Inferência difusa baseada na avaliação individual de regras

Neste caso, cada regra é avaliada individualmente de acordo com a entrada do sistema em cada instante. Assim cada regra irá gerar uma saída que depois será conjugada com as saídas das restantes regras.

O processo de inferência difusa baseada na avaliação individual de regras pode ser descrita, na forma computacional da seguinte forma [62]:

- para cada regra deve ser determinada a função de pertença do antecedente, ou seja determinar:

$$\mu_{A_1^l \times A_2^l \times \dots \times A_n^l}(x_1 \times x_2 \dots \times x_n) = t[\mu_{A_1^l}(x_1), \dots, \mu_{A_n^l}(x_n)] \quad (5-1)$$

- utilizando a um operador de implicação, bem como a expressão anterior e o conjunto  $B_l$  do consequente da regra  $l \in [1, K, M]$ , determinar:

$$\mu_{Ru^{(l)}}(x_1, \dots, x_n, y) = \mu_{A_1^l \times A_2^l \times \dots \times A_n^l \rightarrow B^l}(x_1 \times x_2 \times \dots \times x_n, y) \quad (5-2)$$

- para um dado conjunto de entrada difuso  $A'$  em  $U$  determinar o conjunto difuso  $B'$  em  $V$  para cada regra  $Ru(l)$  de acordo com a regra modus tolens generalizada

$$\mu_{B'}(y) = \sup_x t[\mu_{A'}(x), \mu_{Ru^{(l)}}(x, y)] \quad (5-3)$$

- obter a saída da máquina de inferência difusa como sendo a combinação de M conjuntos difusos  $B_1', \dots, B_M'$ . Esta combinação pode ser efectuada através da conjunção (s-norma) ou intersecção (t-norma) dos vários conjuntos difusos.

Temos assim várias opções no que se refere à escolha da máquina de inferência difusa. O tipo de máquina de inferência dependerá das s-normas ou t-normas escolhidas para a avaliação de cada uma das regras e respectiva agregação na forma de resultado final.

Das diversas máquinas de inferência difusa existentes, duas destacam-se pela sua ampla aplicação em controladores difusos:

- Máquina de inferência Max-Dot
- Máquina de inferência Max-Min

#### *Máquina de inferência Max-Dot*

Nesta máquina de inferência é efectuada a avaliação individual das regras sendo para tal utilizada a implicação de Mamdani na forma de produto. Ao longo de todo o processo de inferência o produto algébrico é utilizado como definição dos operadores t-norma e a função máximo é utilizada como operador s-norma. No final os conjuntos difusos obtidos da avaliação de cada regra são agregados num único conjunto difuso através da operação união. Deste modo, a máquina de inferência MAX-Dot pode ser expressa da seguinte forma:

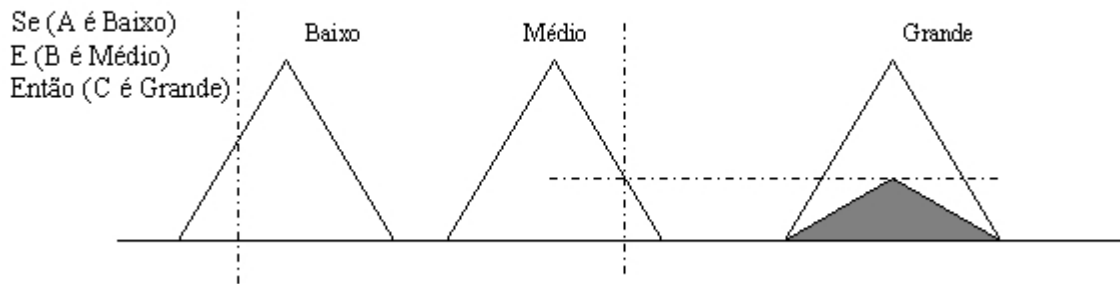
$$\mu_{B'}(y) = \max_{l=1}^M \left[ \sup_{x \in U} (\mu_{A'}(x) \prod_{i=1}^n \mu_{A'_i}(x_i) \mu_{B^L}(y)) \right] \quad (5-4)$$

Se o conjunto difuso  $A'$  for um conjunto singular difuso  $x^*$ , então esta máquina de inferência difusa pode ser simplificada para:

$$\mu_{B'}(y) = \max_{l=1}^M \left[ \left( \prod_{i=1}^n \mu_{A'_i}(x_i^*) \right) \mu_{B^L}(y) \right] \quad (5-5)$$

Na Figura 5-1 apresenta-se um exemplo deste tipo de máquina de inferência difusa.





**Figura 5-1 - Inferência difusa através de uma máquina MAX - DOT**

### *Máquina de inferência Max-Min*

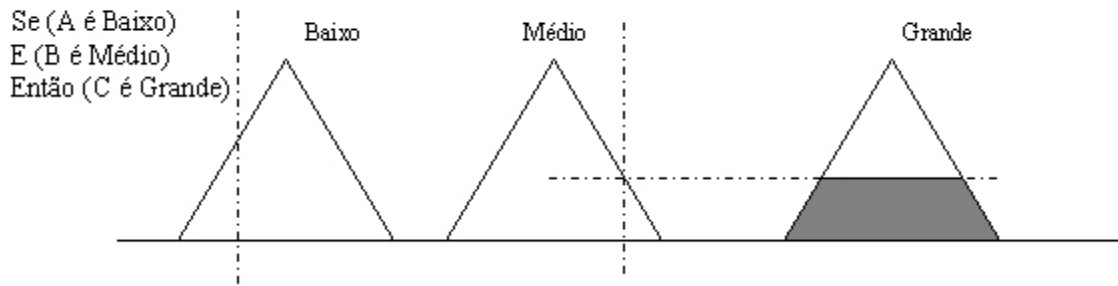
Neste caso, cada regra é avaliada individualmente sendo implementada a implicação de Mamdani na forma de mínimo. O operador mínimo é também utilizado como t-norma, enquanto o operador de máximo é a s-norma. Deste modo a máquina de inferência Max-Min é expressa da seguinte forma:

$$\mu_{B'}(y) = \max_{l=1}^M \left[ \max_{x \in U} \min(\mu_{A'}(x), \mu_{A_1^l}(x_1), \dots, \mu_{A_n^l}(x_n), \mu_{B'}(y)) \right] \quad (5-6)$$

Este processo de inferência difusa pode ser simplificado no caso do conjunto de entrada difuso  $A'$  for considerado um singular difuso  $x^*$ . Assim, se os sinais crespos à entrada do controlador forem fuzzificados com recurso a um fuzzificador singular difuso, a expressão anterior simplifica-se para:

$$\mu_{B'}(y) = \max_{l=1}^M \left[ \min(\mu_{A_1^l}(x_1^*), \dots, \mu_{A_n^l}(x_n^*), \mu_{B'}(y)) \right] \quad (5-7)$$

Na Figura 5-2 apresenta-se um exemplo deste tipo de máquina de inferência difusa.



**Figura 5-2 - Inferência difusa através de uma máquina MAX - MIN**

Considerando esta simplificação e tomando em consideração a que os conjuntos difusos do antecedente de cada regra são agregados através da função mínimo, vem que:

$$\tau_l = \min(\mu(x_1^*), \dots, \mu(x_n^*)) \quad (5-8)$$

onde  $\tau_l$  é denominado de nível de disparo da regra  $l$ . Este índice caracteriza o grau de importância, ou veracidade, do antecedente da regra  $l$ . Pode-se afirmar que, traduz de certo modo o peso que a regra  $l$  tem no resultado final da inferência para determinado valor da entrada.

O conjunto difuso  $\mu_{B'_l}(y)$  resultante da avaliação da regra  $l$  pode então ser determinada por:

$$\mu_{B'_l}(y) = \min(\tau_l, \mu_{B_l}(y)) \quad (5-9)$$

Por fim, os resultados da avaliação de cada regra são agregados num único conjunto  $\mu_{B'}(y)$  obtido por:

$$\mu_{B'}(y) = \max_{l=1}^M(\mu_{B'_l}(y)) = \max_{l=1}^M[\min(\tau_l, \mu_{B_l}(y))] \quad (5-10)$$

constituindo este grupo o conjunto difuso resultante do processo de inferência.

A última expressão deixa transparecer que o resultado deste processo de inferência corresponde de certo modo a uma agregação pesada dos consequentes de cada regra, sendo o peso determinado pelo nível de disparo.

## 5.5 Desfuzzificação

Como já foi referido a desfuzzificação consiste na obtenção de um valor crespo à saída do processo de inferência difusa, de modo a que este seja perceptível para o operador. O processo de desfuzzificação deverá permitir especificar um ponto crespo  $y^*$  em  $V \in R$  que melhor representa  $B'$ , sendo  $B'$  o conjunto resultante do processo de inferência e definido em  $V$ .

No processo de desfuzzificação deverão ser considerados os seguintes pressupostos:

- Plausibilidade: o ponto crespo deverá representar o conjunto  $B'$  de forma intuitiva;
- Continuidade: pequenas alterações no conjunto difuso  $B'$  não podem originar grandes variações no valor de  $y^*$ ;
- Univocidade: o processo de desfuzzificação deverá fornecer apenas um único crespo de saída.

Para efectuar a desfuzzificação existem vários métodos que se apresentam de seguida [47], [66].

### *Método do valor máximo*

Neste método o processo de desfuzzificação determina  $y^*$  como sendo o ponto em  $V$  onde a função de pertença  $\mu_{B'}(y)$  tem o valor máximo, ou seja:

$$altura(B') = \left\{ y \in V \mid \mu_{B'}(y) = \sup_{y \in B} \mu_{B'}(y) \right\} \quad (5-11)$$

que representa o conjunto de pontos onde  $\mu_{B'}(y)$  é máximo. Deste modo, se  $altura(B')$  possuir apenas um ponto então  $y^*$  é univocamente definido. No entanto, se  $altura(B')$  conter

mais do que um ponto então a ambiguidade poderá ser contornada utilizando um dos métodos de desfuzzificação:

- método do Maior dos Máximos;
- método do Menos dos Máximos;
- método da Média dos Máximos.

No método Maior dos Máximos o ponto  $y^*$  corresponde a:

$$y^* = \sup\{y \in altura(B')\} \quad (5-12)$$

ou seja, neste método o maior valor possível do domínio da saída a qual corresponda um valor de grau de pertença máximo.

No caso do Menor dos Máximos o ponto  $y^*$  corresponde a:

$$y^* = \inf\{y \in altura(B')\} \quad (5-13)$$

a que corresponde ao menor valor possível do domínio da saída a qual corresponde um valor de grau de pertença máximo.

Finalmente o Método da Média dos Máximos determina a média entre todos os valores do domínio da saída que possuam um grau de pertença máximo.

$$y^* = \frac{\int_{altura(B')} y \, dy}{\int_{altura(B')} dy} \quad (5-14)$$

#### *Método do Centro de Gravidade*

O método do Centro de Gravidade, também denominado por método de Centro de Área ou método do Centróide, é um método normalmente associado a sistemas baseados em operadores de Mamdani, um dos métodos de inferência difusa mais utilizados. Neste caso, o

ponto  $y^*$  corresponde ao ponto que representa o centro de área definida pela função de pertença  $B'$ :

$$y^* = \frac{\int_V y \mu_{B'}(y) dy}{\int_V \mu_{B'}(y) dy} \quad (5-15)$$

As principais vantagens deste método referem-se ao facto de que é possível verificar que o sistema é contínuo e unívoco. Como desvantagens, apresenta-se o facto de que o ponto obtido pode corresponder a um ponto com valor de pertença baixo e tratar-se de um processo pesado computacionalmente. Quando este método é aplicado sobre o resultado final do processo de inferência difusa, no caso de se aplicar uma máquina de inferência Max-Min, não é levado em linha de conta as áreas dos conjuntos difusos resultantes da avaliação de cada regra que se sobrepõem no resultado final.

#### *Método do Centro das Somas*

O método do Centro das Somas tem em consideração a contribuição de cada conjunto difuso  $B'_i$  tem no conjunto final  $B'$ . Assim, considera-se a soma dos valores da função de pertença de cada conjunto difuso  $B'_i$  para cada ponto  $y \in V$ , reflectindo deste modo no valor crespo obtido a sobreposição dos conjuntos  $B'_i$  no resultado final. Este fuzzificador pode ser expresso através da seguinte expressão:

$$y^* = \frac{\int_V (y \times \sum_{i=1}^M \mu_{B'_i}(y)) dy}{\int_V \sum_{i=1}^M \mu_{B'_i}(y) dy} \quad (5-16)$$

em que  $l$  representa o número de regras  $M$  que compõe a base de regras.

#### *Método da Média dos Centros*

Finalmente, este método consiste na soma pesada dos centros dos conjuntos difusos agregados em  $B'$ . Ou seja, considera-se  $\bar{y}^l$  como sendo o ponto central do conjunto difuso  $B'_l$  resultante da avaliação da regra  $l$  e em que  $w_l$  é a sua altura. Deste modo o ponto  $y^*$  é obtido por:

$$y^* = \frac{\sum_{l=1}^M \bar{y}^l w_l}{\sum_{l=1}^M w_l} \quad (5-17)$$

## 5.6 Conclusões

Neste capítulo foram abordadas as questões teóricas relativas ao projecto de sistemas difusos, nomeadamente os aspectos relacionados com cada um dos seus módulos: fuzzificação, base de dados, base de regras, máquina de inferência difusa e desfuzzificação.

Relativamente à fuzzificação foram apresentadas as características que estes deverão possuir e que deverão ser respeitadas.

Quanto à base de dados alertou-se para a sua importância, já que está directamente relacionada com a fuzzificação, a base de regras desfuzzificação. foram apresentadas as suas propriedades mais importantes.

No que diz respeito à base de regras foram apresentadas as características que esta deverá possuir. Foram analisados os dois tipos de regras que existem, ou seja, as regras de tipo Mamdani e Takagi-Sugeno e respectivas definições.

Para a máquina de inferência difusa foram apresentadas as duas empregues no mecanismo de inferência de um sistema difuso, inferência baseada na composição de regras, e a inferência baseada na avaliação individual de regras. Como foi referido e justificado que nos modelos a desenvolver será utilizada a segunda abordagem. Neste sentido foram detalhados os tipos de máquina de inferência existentes e que utilizam esta abordagem, ou seja, a máquina MAX-DOT e MAX-MIN.

Finalmente foram descritos quais os pressupostos a assumir quando se efectua uma desfuzzificação e quais os vários métodos existentes para a sua realização.

## **6 Modelização dos sistemas de inferência difusa**

Neste capítulo apresentam-se os modelos desenvolvidos para a energia eólica e solar fotovoltaica. A filosofia subjacente a este desenvolvimento é extrapolável para as outras formas de energia. Os modelos baseiam-se nos conceitos apresentados no capítulo anterior.. Ao longo deste capítulo serão apresentadas e justificadas as opções assumidas para cada um dos modelos desenvolvidos.

Tendo como ponto de partida a incerteza de índole não probabilística associada aos recursos naturais, assumimos modelos possibilísticos na modelização da incerteza. Ao longo deste capítulo, será explicado e justificado o tipo de fuzzificação assumido para as variáveis de entrada e saída, tendo em conta a caracterização das respectivas variáveis, a sua forma e gama de variação. Será explicada e justificada a definição das regras em ambos os modelos, bem como apresentados alguns exemplos das mesmas.

Para cada modelo, apresentam-se pequenos exemplos de aplicação onde se poderão constatar as potencialidades e utilidade dos modelos desenvolvidos. Serão apresentados casos em que a partir da incerteza assumida nas variáveis de entrada se verificará o comportamento dos modelos.

Por fim, explica-se como foram implementados os modelos através do Sistema de Inferência Difusa do Matlab. Apresentam-se as varias opções disponíveis para a fuzzificação das variáveis de entrada e saída, bem como para a desfuzzificação da saída, para a implicação e agregação.

### **6.1 Informação recolhida**

Para a definição dos modelos de inferência difusa a desenvolver nesta tese utilizou-se a informação recolhida em base de dados, que se identificam mais adiante.

Esta informação foi levantada com a preocupação de garantia e certificação da disponibilização de dados com precisão, credíveis e fiáveis, bem como em quantidade suficiente. A precisão reflecte-se na completude e consistência dos dados, ou seja que características estão retratadas e quais as relações entre elas. Relativamente à quantidade, teve-se a preocupação que esta apresentasse um detalhe e densidade de informação suficientes à caracterização dos seus

elementos. O detalhe reflecte-se em quanta informação e atributos estão armazenados para cada característica, e a densidade é uma medida de quantos aspectos estarão armazenados.

Para o modelo de inferência difusa eólico a base de dados refere-se ao EOLOS 2.0 desenvolvido pelo INETI (Instituto de Engenharia e Tecnologia Industrial), onde se apresenta o potencial eólico para vários locais em Portugal Continental através de um conjunto de índices que permitem caracterizar os respectivos potenciais energéticos, enquanto que para o solar fotovoltaico as bases de dados referem-se à “Performance Database” da Agência Internacional de Energia e a base de dados SODA desenvolvida pela Ecôle des Mines. A primeira refere-se a uma base de dados que resulta da monitorização de 266 sistemas fotovoltaicos instalados em diversos países, entre os quais Portugal, somando um total de 11 MWp e abrangendo uma gama de potências entre 0.1 kWp e 3 MWp. A segunda resulta de um projecto desenvolvido pela Ecôle des Mines e onde é possível obter os valores da radiação solar global para qualquer ponto definido na gama de latitudes compreendida entre 25° e 70°.

Pretendeu-se com estas base de dados, caracterizar da forma mais completa possível a incerteza associada a este tipo de produção renovável com particular enfoque para a incerteza ao nível do recurso natural, velocidade ou direcção do vento ou características da radiação solar, bem como ao nível da tecnologia.

Relativamente aos recursos naturais, o objectivo foi caracterizar as suas gamas de variação, a forma como variam e determinar em que locais ocorrem de modo a obter-se uma caracterização mais precisa possível. No que respeita à tecnologia pretendeu-se caracterizar os aspectos relativos ao rendimento, aos níveis de produção e outros aspectos que se considerem pertinentes.

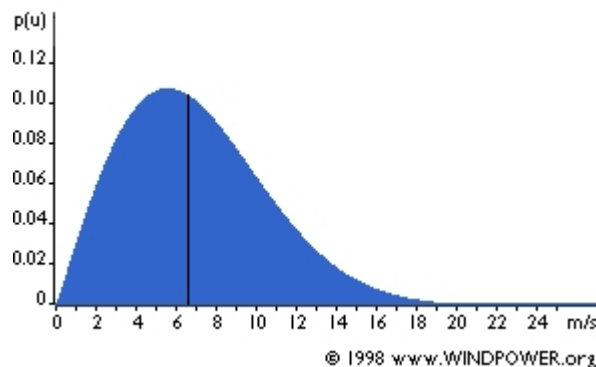
Os elementos e grandezas que constam destas bases de dados foram analisados de forma a determinar o seu comportamento e possíveis relações entre eles.

## **6.2 Modelo Eólico**

Na modelização de sistemas eólicos o principal objectivo foi incorporar a incerteza identificada no Capítulo 3, ou seja, a incerteza associada ao próprio recurso. Como foi referenciado o recurso natural, o vento, apresenta uma variabilidade ao longo do ano, bem como uma dependência do local em que o parque eólico será instalado e da sua orografia.



Normalmente a representação do vento é efectuada através de uma distribuição de probabilidade, normalmente a de Weibull, tal como se pode constatar na seguinte figura.



**Figura 6-1– Distribuição de Weibull**

Pela Figura 6-1 pode-se observar a função densidade distribuição de probabilidade do vento, em que a área sob a curva é 1, visto que a probabilidade do vento soprar a uma dada velocidade incluindo zero deve ser de 100%. O traço visível na figura define a mediana da distribuição, ou seja, as áreas à esquerda e direita desse traço são iguais. Isto significa, que durante metade do tempo o vento terá uma intensidade superior a 6.6 m/s e na outra metade terá um valor inferior. Por outro lado, pode observar-se que a distribuição é deslocada, o que significa que existe uma maior probabilidade de o vento ter uma velocidade na ordem dos 5 – 6 m/s, por outro lado é possível obter valores elevados de velocidade mas, com probabilidades muito baixas.

Se os valores recolhidos se referirem a uma altura inferior à altura do hub da turbina a instalar, estes terão de ser ajustados utilizando para tal os métodos referenciados na secção 3.3. Como se pode verificar são vários os tipos de incerteza que terão de ser levados em linha de conta.

Para a implementação deste modelo utilizaremos informação proveniente da base de dados EOLOS 2.0, bem como noções derivadas do julgamento humano, tais como opiniões de peritos. Estas opiniões de peritos são importantes, porque permitem incluir no modelo aspectos que não se encontram retratados em base de dados. Por exemplo, como será possível constatar mais adiante, a velocidade do vento está muito relacionada com o fluxo de potência. É assim também importante que as funções de pertença dos antecedentes e consequentes sejam de fácil interpretabilidade pelas pessoas.

O objectivo deste modelo de inferência difusa é o cálculo da energia a produzir mensalmente por um dado parque eólico. Deste modo, a expressão a utilizar para o cálculo da energia eólica produzida surge da composição de elementos que constituem a base de dados utilizada para a definição deste modelo de inferência difusa. Assim a expressão para a determinação da energia é a seguinte:

$$Energia = F_{pot} \times NEP \times Área \quad (6-1)$$

em que:

- Energia: valor mensal produzido pelo parque eólico;
- $F_{pot}$ : Fluxo de Potência (MWh/ha);
- NEP: número mensal de horas equivalentes de produção à potência nominal (h/mês);
- Área: área disponível para a implantação do parque (ha).

Para além destas variáveis, considera-se também a velocidade média do vento, permitindo assim incluir informação adicional sobre o recurso natural.

### **6.2.1 Variáveis de entrada e saída**

Para a definição das variáveis de entrada do modelo de inferência difusa eólico é importante considerar as conclusões definidas no Capítulo 3. Assim, as variáveis de entrada deverão caracterizar a variação do recurso natural e tecnologia. A expressão 6.1 serve de base ao modelo a desenvolver e define as variáveis de entrada do modelo, em conjunto com a velocidade média do vento.

A opção por estas variáveis deve-se ao facto de as podermos caracterizar de acordo com a base de dados EOLOS 2.0. A inclusão de outros factores poderia ter sido considerada, no entanto deparou-se com o facto de não se ter encontrado fontes de informação que as permitissem caracterizar, tal como o efeito de esteira que é influenciado pela disposição das turbinas no parque.

Deste modo, o modelo eólico apresenta como variáveis de entrada a velocidade média do vento, o fluxo de potência, NEP e a área, enquanto que a variável de saída será a energia produzida. Cada uma das variáveis de entrada será caracterizada à medida que se trata do seu processo de fuzzificação, que se descreve na secção seguinte.

### **6.2.2 Fuzzificação das variáveis de entrada e saída**

Após uma análise dos dados referentes às variáveis de entrada foi necessário proceder à sua fuzzificação de forma a reflectir a incerteza associada. Para tal, como já foi referido, foram analisados os dados referentes à base de dados Eolos 2.0, elaborado pelo INETI. Os valores que constam desta base de dados e que foram alvo de uma análise mais cuidada referem-se à velocidade média do vento a 40 metros de altura, fluxo de potência e número de horas equivalentes à potência nominal (NEP).

A definição das gamas de incerteza nos conjuntos difusos para cada uma das variáveis de entrada está intimamente ligada ao número de regras que o modelo terá. De facto, quanto maior for o número de conjuntos difusos que definirá cada uma das variáveis de entrada, maior será o número de regras que o sistema de inferência difusa terá. Será então necessário ter esse aspecto em consideração, de modo a não se construir um sistema com um grande número de regras e assim de difícil interpretação.

Os valores referentes à velocidade média do vento permitirão caracterizar o seu comportamento e consequentemente a sua variação, retirando as conclusões relativamente às quais deverão ser as suas gamas de variação, bem como variáveis linguísticas e forma dos conjuntos difusos a atribuir. Deste modo, verifica-se que a sua variação encontra-se numa gama definida entre os 4 e 9 m/s. No entanto, na representação difusa da velocidade média do vento considerou-se uma gama de variação superior, ou seja entre os 4 e 14 m/s de modo a possibilitar a consideração de um maior número de casos. Na Figura 6-2 é possível verificar a representação difusa assumida.

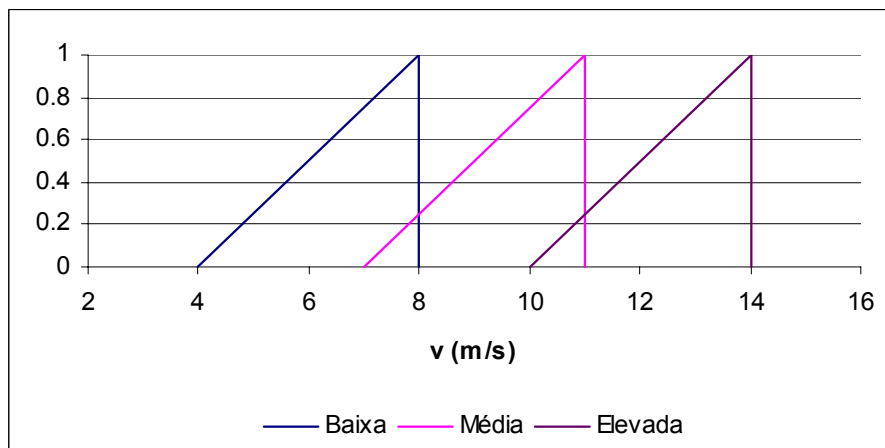


Figura 6-2 - Representação difusa da velocidade média do vento

Considerando a gama de variação referenciada e efectuando a análise dos valores referentes à velocidade média do vento e por inspecção do mapa dos ventos de Portugal continental concluiu-se que seriam necessários três gamas de velocidade do vento reflectidas em outros tantos conjuntos difusos, que se traduzem em correspondentes grandezas linguísticas, para a sua representação. São eles “Velocidade Baixa”, “Velocidade Média” e “Velocidade Elevada”, tendo-se optado por uma representação triangular para cada um dos conjuntos. A justificação por esta representação triangular tem a ver não só com o facto de este ser o tipo de representação difusa mais comum, mais fácil de incluir nos modelos, mas também pelo facto de permitir uma melhor interpretabilidade.

Poderia colocar-se a questão relativamente à variável linguística “Velocidade Baixa”, o porquê de não considerar como limite inferior 0 m/s. Tal opção, deve-se ao facto de se estar a lidar com valores médios e não com valores instantâneos de variação da velocidade do vento. Deste modo, o valor de 4 m/s afigura-se como um valor razoável para limitar esta variável linguística. O mesmo argumento poderá ser utilizado para justificar o valor adoptado como limite superior da variável linguística “Velocidade Elevada”.

Com o Fluxo de Potência é possível determinar a potência incidente por unidade de área. Obtém-se com este elemento uma informação relativamente à dimensão da turbina e energia disponível no escoamento. A sua representação difusa encontra-se na Figura 6-3.

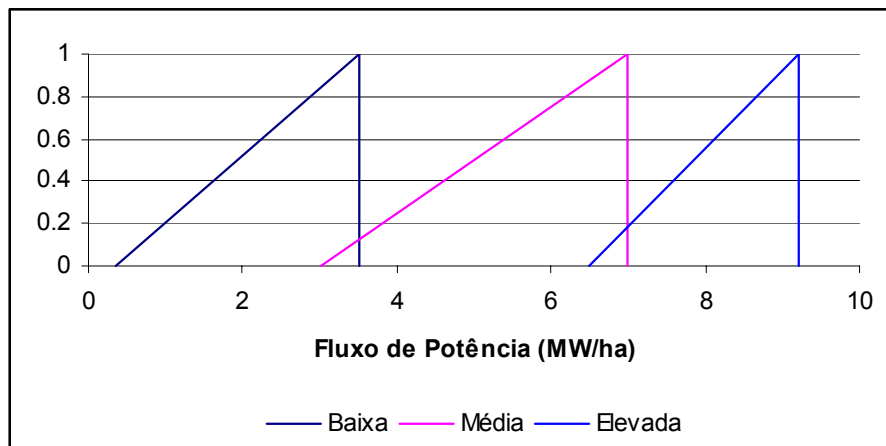
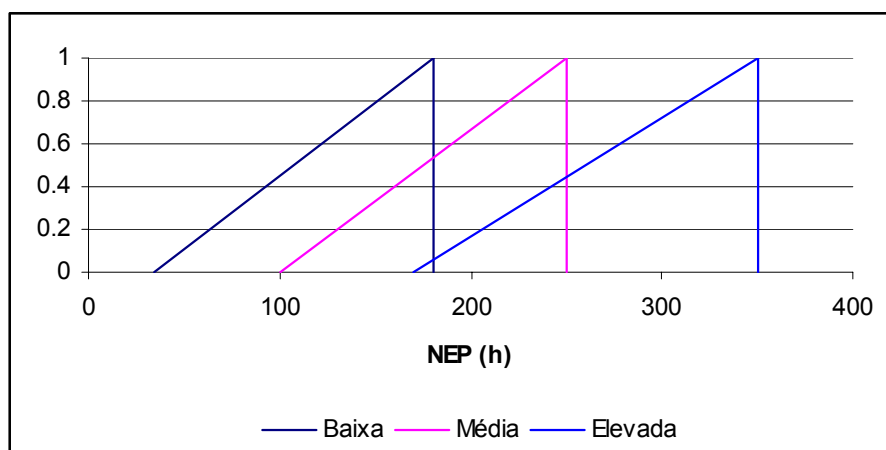


Figura 6-3 - Representação difusa do Fluxo de Potência

Tal como se pode verificar, a sua gama de variação situa-se entre os 0.35 e 9.5 MW/ha. Os conjuntos difusos que representam o Fluxo de Potência são três, referentes às variáveis linguísticas “Baixa”, “Média” e “Elevada”, e de forma triangular.

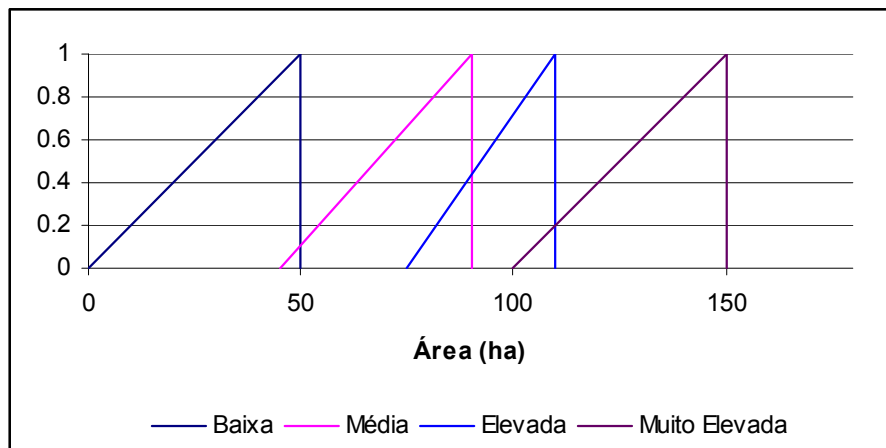
A variável de entrada NEP refere-se ao número de horas de produção à potência nominal, ou seja, permite caracterizar a intensidade do vento, o que se reflectirá no funcionamento das turbinas que compõem o parque eólico. Assim, quanto maior for o NEP, maior será o período de tempo em que o parque esteve a produzir à sua potência nominal, logo maior será a sua produção. Por outro lado, esta variável de entrada inclui também o efeito da indisponibilidade de um parque eólico devido a acções de manutenção. Estas acções de manutenção poderão ser causadas por avarias ou então por acções programadas. É assim possível incluir no modelo através desta variável um dos aspectos que tem impacto na produção eólica, tal como foi destacado na secção 3.3. A unidade que exprime esta grandeza normalmente é referida a horas por ano, no entanto para o modelo em questão, a sua unidade será horas/mês de forma a se obter a produção de energia mensal. A sua representação difusa encontra-se na Figura 6-4.



**Figura 6-4 - Representação difusa de NEP**

Analisando os valores referentes ao NEP que constam na base dados, verifica-se que a variação desta grandeza encontra-se limitada entre 35 e 350 horas/mês. Mais uma vez a sua representação é efectuada por três conjuntos difusos triangulares referentes a “Baixa”, “Média” e “Elevada”.

Relativamente à variável área são levantam-se várias questões. Primeiro, qual a área disponível e as características do local onde ela se encontra. Normalmente os locais com maior potencial em nível de velocidade de vento são locais protegidos, sejam eles Reserva Natural ou Reserva Agrícola, o que coloca limitações à instalação de parques eólicos. Por outro lado, existe a questão da potência das máquinas a instalar. Actualmente a tendência passa pela instalação de máquinas de grande potência, da ordem dos 3 MW, o que leva a que os afastamentos entre as turbinas tenha de ser cada mais maior de modo a evitar efeitos de esteira, o que implica que as áreas disponíveis tenham de ser superiores. Neste modelo considerou-se que esta grandeza deveria ter como limite superior 150 ha. Outro valor, poderia ter sido adoptado, mas considerou-se que este seria um valor razoável. Aliás se forem analisados os Plano Nacional Agrícola (PNA) e a Rede Natura chega-se à conclusão que em conjunto com a orografia do terreno e a qualidade do vento não haverá áreas disponíveis superiores. Na Figura 6-5 representam-se as gamas de incerteza definidas para a área difusa.

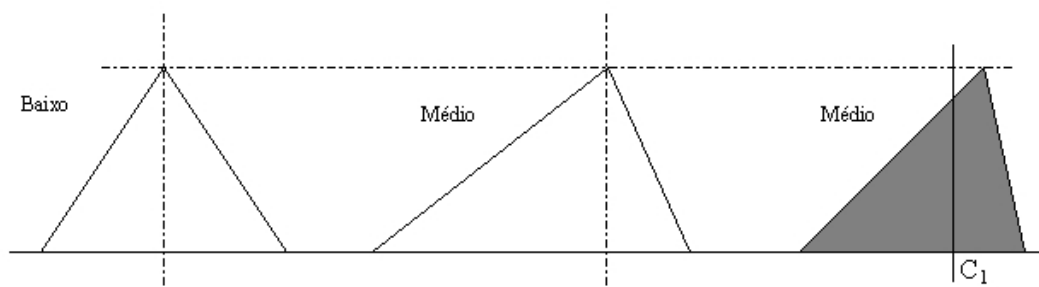


**Figura 6-5 - Representação difusa da área**

Como se pode verificar a área terá uma variação compreendida entre 5 e 150 ha, o que constitui uma amplitude significativa. Surgiu assim, a necessidade de considerar um maior número de conjuntos difusos de modo a caracterizar de uma forma mais correcta esta variável de entrada. Deste modo, considerou-se a definição de quatro conjuntos difusos referentes a “Baixa”, “Média” e “Elevada” e “Muito Elevada” cuja forma é triangular.

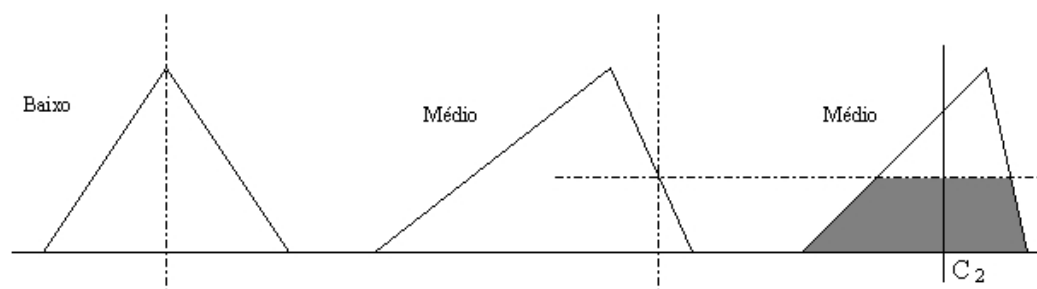
Como se verificou pelas várias figuras referentes às variáveis de entrada, a forma assumida para os conjuntos difusos é a triangular, com o valor da função de pertença mais elevado a coincidir com o valor mais elevado em cada intervalo de variação. Tal opção deve-se ao facto do sistema de inferência difusa se tornar mais perceptível a quem o utiliza. Para uma melhor compreensão apresentam-se as seguintes figuras.

SE (A é Baixo)  
E (B é Médio)  
ENTÃO (C é Médio)



**Figura 6-6 - Exemplo de um sistema de inferência difusa para a obtenção de  $C_1$**

SE (A é Baixo)  
E (B é Médio)  
ENTÃO (C é Médio)



**Figura 6-7 - Exemplo de um sistema de inferência difusa para obtenção de  $C_2$**

Estas figuras referem-se a um exemplo de um sistema de inferência difusa, muito simples, composto apenas por duas variáveis de entrada, A e B, e uma de saída, C. O método utilizado para a desfuzzificação é o centróide. Assim, como se pode verificar, se os valores de entrada seleccionados se encontrarem à direita do valor com função de pertinência máximo, na saída corresponderá um valor inferior ao que corresponderia se os valores seleccionados correspondessem aos valores de grau de pertinência máximo. Comparando os valores de  $C_1$  e  $C_2$ , que correspondem às saídas desfuzzificadas da regra em consideração, verifica-se que  $C_2$  é inferior. Esta situação, do ponto de vista de um utilizador não familiarizado com estas questões, poderia de algum modo ser confusa, já que ao aumentar o valor das variáveis de entrada deparava-se com uma diminuição do valor da saída.

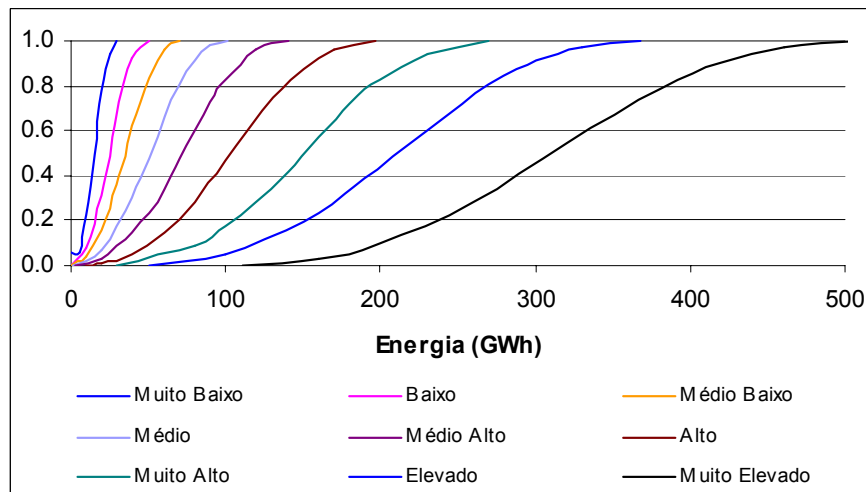
A forma encontrada para fazer face a esta situação, passou pela adopção das várias formas dos conjuntos difusos triangulares em forma de “dente de serra”. O facto de se coincidir o valor máximo do grau de pertinência, com o limite superior do intervalo de variação, impede que situações deste tipo ocorram porque, ao aumentar os valores de entrada além desses limites, leva a que outras regras sejam activadas e portanto com saídas superiores às anteriores.

Depois de definidas e caracterizadas as variáveis de entrada do modelo de inferência difusa para sistemas eólicos, é necessário caracterizar a variável de saída. Como já foi referido anteriormente a saída do modelo eólico será a Energia estimada mensalmente a produzir pelo parque eólico.

Para determinar a gama de variação da energia determinou-se o espaço de soluções que resulta da combinação das gamas definidas pelas variáveis de entrada. Para tal, efectuou-se o cálculo da energia a produzir utilizando a expressão 6.1 na secção 6.2. Verificou-se assim que a



energia a produzir variará entre 0.01 e 500 GWh por mês. Face a esta gama de variação, considerou-se a definição de nove conjuntos difusos que representam as variáveis linguísticas “Muito Baixo”, “Baixo”, “Médio Baixo”, “Médio”, “Médio Alto”, “Alto”, “Muito Alto”, “Elevado” e “Muito Elevado”. Quanto à forma de cada um dos conjuntos difusos optou-se pela curva em forma de S que permite melhores resultados face a outras formas de representação difusa. Na Figura 6-8 encontra-se a representação difusa da Energia.



**Figura 6-8 - Representação difusa da Energia produzida mensalmente**

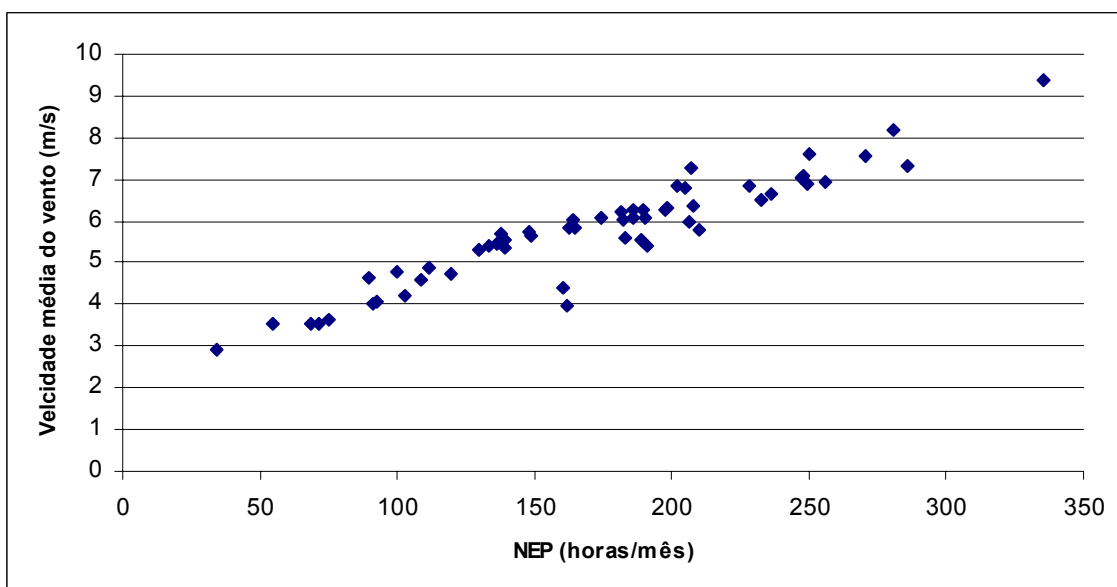
### 6.2.3 Definição de Regras

Para a definição das regras afigura-se importante combinar a informação disponível ao julgamento humano expresso através de opiniões de peritos. Esta combinação permite afinar o modelo a desenvolver e assim torná-lo mais coerente com a realidade. Para além disso análise lógica das regras, poderão levar à eliminação de algumas delas reduzindo assim o número total de regras a considerar nos modelos. De seguida passa-se a demonstrar as afirmações feitas.

Um problema que se coloca quando se pretendem definir na definição do número de regras, prende-se com o facto de o seu número aumentar quando o número de variáveis e a complexidade do problema a ser tratado aumentam. Esta relação é combinatorial. Uma forma de se tratar este problema passa pela consideração de mecanismos de raciocínio lógico, para traduzir o significado de conjuntos de regras para formas de melhor interpretação por parte das pessoas.

Como já foi referido na secção 5.3 o tipo de regras a adoptar podem ser de dois tipos, i.e., regras de tipo Mamdani ou do tipo Takagi-Sugeno. As regras do tipo Mamdani permitem efectuar a partição dos consequentes através de conjuntos difusos, enquanto que nas Takagi-Sugeno os consequentes são representadas por valores crespas que resultam da composição das várias regras. As regras de tipo Mamdani permitem uma melhor interpretação das regras baseadas nas variáveis linguísticas. No que diz respeito à complexidade na implementação, as Takagi-Sugeno de ordem zero são bastante mais simples no processo de desfuzzificação. No entanto, como nos modelos a desenvolver privilegia-se a interpretabilidade das regras, opta-se pela implementação das regras do tipo Mamdani.

Assim, face à definição das variáveis de entrada teríamos no total de regras de 108, resultante da combinação das variáveis linguísticas de cada uma das entradas. No entanto, verifica-se que será possível eliminar certas regras, visto que existe uma correlação entre as variáveis de entrada. Assim, verifica-se que nos locais com elevadas velocidades de vento, os valores de NEP serão também elevados, já que permite às turbinas eólicas um funcionamento mais constante à potência nominal. Por outro lado, os valores do Fluxo de Potência também serão maiores, do que em locais onde a velocidade do vento seja menor. Isto leva, a que algumas combinações de regras sejam descartadas. Por exemplo, um local com uma velocidade média de 5 m/s não terá como NEP um valor de 300 horas/mês, logo a regra que seria obtida por esta combinação será eliminada. Na Figura 6-9 e Figura 6-10 ilustra-se as relações entre a velocidade média do vento e o NEP e Fluxo de Potência respectivamente.



**Figura 6-9 - Relação entre a velocidade média do vento e NEP**

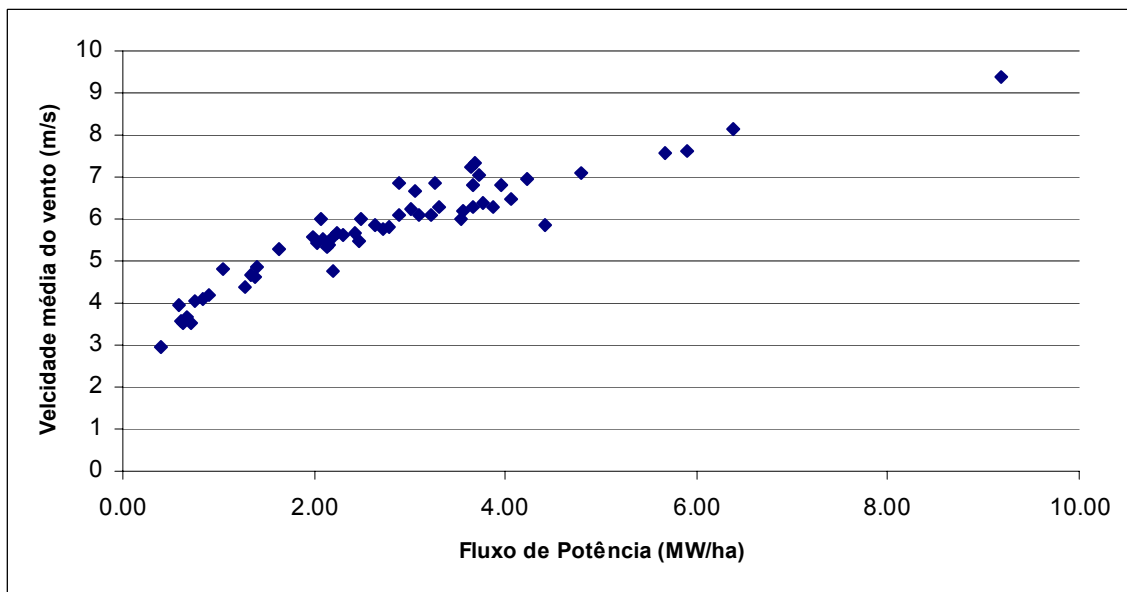


Figura 6-10 - Relação entre a velocidade média do vento e o Fluxo de Potência

Assim, partindo de um total de 108 regras e depois de eliminar aquelas em que existem incompatibilidades chega-se a um valor final de 44 regras, que permitem assim definir o modelo de inferência difusa para um sistema eólico.

De seguida, apresentam-se alguns exemplos das regras deste modelo:

Se a *Velocidade Média* é **Baixa** e o *Fluxo de Potência* é **Baixo** e o *NEP* é **Baixo** e a *Área* é **Baixa**, Então a *Energia Produzida Mensalmente* é **Muito Baixa**;

Se a *Velocidade Média* é **Média** e o *Fluxo de Potência* é **Baixo** e o *NEP* é **Médio** e a *Área* é **Baixa**, Então a *Energia Produzida Mensalmente* é **Baixa**;

Se a *Velocidade Média* é **Média** e o *Fluxo de Potência* é **Médio** e o *NEP* é **Baixo** e a *Área* é **Muito Elevada**, Então a *Energia Produzida Mensalmente* é **Médio Alto**;

Se a *Velocidade Média* é **Alta** e o *Fluxo de Potência* é **Médio** e o *NEP* é **Médio** e a *Área* é **Muito Elevada**, Então a *Energia Produzida Mensalmente* é **Alta**;

Se a *Velocidade Média* é **Alta** e o *Fluxo de Potência* é **Alto** e o *NEP* é **Alto** e a *Área* é **Muito Elevada**, Então a *Energia Produzida Mensalmente* é **Elevada**.

#### 6.2.4 Desfuzzificação

A saída do sistema de inferência difusa, obtida pela aplicação das regras, consiste num conjunto difuso que para facilitar a percepção terá de ser desfuzzificado num número crespo, de modo a permitir uma melhor interpretação a quem opera o sistema de inferência difusa. Pretende-se que o método de desfuzzificação a seleccionar permita obter resultados de fácil compreensão por parte do utilizador. Dos vários métodos de desfuzzificação referidos na secção 5.5 optou-se pelo método do Menor dos Máximos. Este método revelou-se mais eficaz e mais sensível a variações das variáveis de entrada do que os restantes métodos de desfuzzificação.

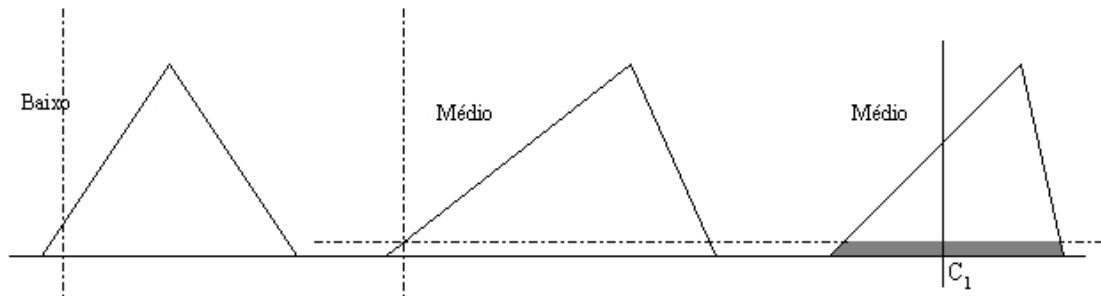
De facto, se a opção tivesse recaído nos métodos do Centróide e Bissetor não se obteria todo a gama de valores definida pela variável de saída. Considerando o sistema de inferência difuso apresentado na secção 6.2.3, se os valores de entrada dos conjuntos difusos A e B correspondessem aos valores com grau de pertença máxima, na saída obter-se-ia um valor que corresponderia a um valor médio do intervalo definido para a saída. Deste modo, nunca se obtém todos os valores definidos na saída, particularmente os referentes aos valores máximos da saída.

O método Maior dos Máximos apresenta algumas debilidades na eficácia, porque quando uma das variáveis de entrada atinge o seu valor de pertença máxima, na saída obter-se-á o seu valor máximo, independentemente do valor da outra variável de entrada. Esta situação é prejudicial do ponto de vista da utilização do modelo porque, deste modo a saída apresentará valores superiores aos que realmente correspondem.

Restam dois métodos, o Menor dos Máximos e a Média dos Máximos. Pela experiência adquirida o método mais eficiente é o Menor dos Máximos, tal como se pode verificar nas figuras 6.11 e 6.12.

Na Figura 6-11 o método utilizado é a Média dos Máximos. Neste caso, quando os valores das variáveis de entrada referem-se a valores que se encontram no início dos seus conjuntos difusos respectivos a saída corresponderá ao valor  $C_1$ , que corresponde a um valor central do conjunto difuso que define a saída. O problema que se coloca com este método, prende-se com o facto de não ser possível obter na saída os valores que se encontram mais à esquerda de  $C_1$ , ou seja os referentes aos menores valores do conjunto difuso de saída.

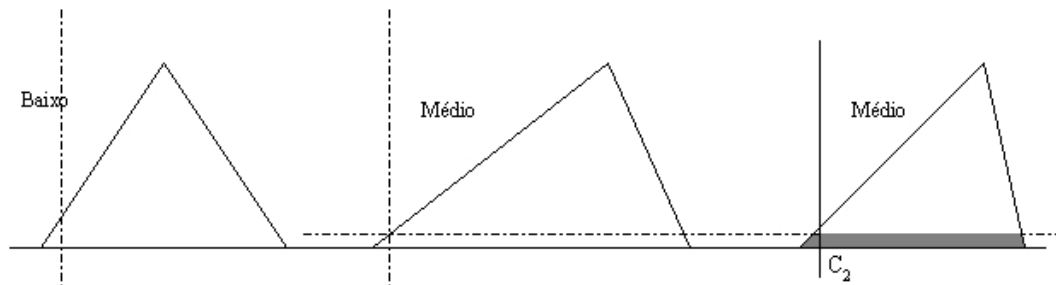
SE (A é Baixo)  
E (B é Médio)  
ENTÃO (C é Médio)



**Figura 6-11 – Desfuzzificação com o método Média dos Máximos**

No entanto, se se utilizar o método Menor dos Máximos esta situação é solucionada, tal como se pode constatar na Figura 6-12.

SE (A é Baixo)  
E (B é Médio)  
ENTÃO (C é Médio)



**Figura 6-12 – Desfuzzificação com o método Menor dos Máximos**

Como se pode observar, com este método é possível obter na saída os valores que se encontram no início do conjunto difuso que define a saída, tal como o ponto  $C_2$ . é assim possível com este método obter toda a gama de valores definidos pelo conjunto difuso de saída. Por estas razões, o método de desfuzzificação adoptado para o modelo desenvolvido é o Menor dos Máximos.

### 6.2.5 Resultados

Para ilustrar o desempenho deste sistema de inferência difusa apresenta-se de seguida, um exemplo de aplicação. Assim, considerando a localidade de Lagares, concelho de Penafiel, distrito do Porto verifica-se que a velocidade média do vento é de 4.74 m/s, com um Fluxo de Potência de 2.19 MW/ha e um NEP de 120 horas/mês. Relativamente à área não existe qualquer informação, pelo que irá considerar-se um conjunto de áreas e assim obter para cada caso a energia produzida. Na Tabela 6-1 pode-se observar os resultados obtidos.

**Tabela 6-1 - Energia produzida para diferentes áreas**

Velocidade média do vento (m/s)		Fluxo de Potência (MW/ha)		NEP (horas)		Área (ha)		Energia (GWh)	
Valor	Variável Linguística	Valor	Variável Linguística	Valor	Variável Linguística	Valor	Variável Linguística	Valor	Variável Linguística
4.74	“Baixa”	2.19	“Baixa”	120	“Média”	30	“Baixa”	9.9	“Baixa”
						70	“Média”	19.7	“Média Baixa”
						100	“Elevada”	24.6	“Média”
						120	“Muito Elevada”	34.4	“Média Alta”

Através da tabela é possível observar a variável linguística que é activada para cada um dos valores das variáveis de entrada. Simultaneamente observa-se as regras que estas variáveis linguísticas formam e consequentemente qual o conjunto difuso da saída que é activado e qual o seu valor desfuzzificado. Como exemplo, Se *Velocidade do vento* é “Baixa” e *Fluxo de Potência* é “Baixa” e *NEP* é “Média” e *Área* é “Baixa” Então *Energia* é “Baixa”. Esta forma de representação será adoptada para os restantes exemplos de aplicação.

Como seria de esperar, à medida que a área aumenta a energia produzida também aumentará. Torna-se assim possível, avaliar o potencial de um local sem que se disponha de todos os dados necessários à sua caracterização.

Efectuando o mesmo exercício para o local de Arruda, concelho de Arruda e distrito de Lisboa, obtém-se:

Tabela 6-2 - Energia produzida para diferentes áreas

Velocidade média do vento (m/s)		Fluxo de Potência (MW/ha)		NEP (horas)		Área (ha)		Energia (GWh)	
Valor	Variável Linguística	Valor	Variável Linguística	Valor	Variável Linguística	Valor	Variável Linguística	Valor	Variável Linguística
6.88	“Baixa”	3.26	“Baixa”	249	“Média”	20	“Baixa”	24.6	“Baixa”
						60	“Média”	29.5	“Média Baixa
						100	“Elevada”	63.8	“Média”

### 6.3 Modelo Solar Fotovoltaico

No modelo a desenvolver pretende-se incluir as incertezas, referidas no Capítulo 3, que afectam a produção de energia a partir de instalações solares fotovoltaicas. Relembrando os factores de incerteza mencionados, referem-se à variação do recurso natural, ou seja a radiação solar, ao longo do ano e em função do local em que a instalação será colocada. Os aspectos intrínsecos à tecnologia referem-se ao rendimento das instalações devido ao tipo de células fotovoltaicas utilizadas, que apresentam diferentes níveis de eficiência, bem como dos restantes componentes de um sistema solar fotovoltaico. Também o tipo de utilização destinado à central fotovoltaica, seja a ligação à rede ou para consumo próprio, influi no seu rendimento.

Como já foi referido o objectivo deste modelo de inferência difusa é o de avaliar o potencial de produção de energia solar fotovoltaica. Assim, a expressão que serve de base à implementação deste modelo é a seguinte:

$$EAU = RG \cdot \eta_{STC} \cdot A \cdot FP \quad (6-2)$$

em que:

- EAU: é a energia anual utilizada;
- RG: radiação global por ano;
- $\eta_{STC}$ : rendimento do painel em Standard Test Conditions, ou seja temperatura de 25 °C, e radiação global de 1000 W/m<sup>2</sup>;

- A: área do painel;
- FP: factor de performance.

Por sua vez,  $\eta_{STC}$  é obtida pela seguinte expressão:

$$\eta_{STC} = \frac{P_0}{A.RG_{I,ref}} \quad (6-3)$$

em que:

- $P_0$ : é a potência nominal do painel;
- A: é a área do painel;
- $R_{G,I,ref}$ : radiação global de referência (1000 W/m<sup>2</sup>).

O factor de performance (FP) depende do sistema, das características dos seus componentes e do tipo de utilização. A Agência Internacional de Energia no seu relatório “Analysis of Photovoltaic Systems” refere que o FP assume como valores típicos os que constam da seguinte tabela:

**Tabela 6-4** - Valores típicos do Factor de Performance

Tipo de Sistema	Factor de Performance
Sistemas ligados à rede	0.6 – 0.8
Sistemas isolados sem armazenamento	0.1 – 0.6
Sistemas isolados com armazenamento	0.3 – 0.6

Como se pode observar na Tabela 6-4, os valores superiores são atingidos nos sistemas ligados à rede. Neste modelo estamos a considerar apenas sistemas solares fotovoltaicos deste tipo pelo que, tomou-se como simplificação para este factor o valor de 1. Esta opção teve igualmente a ver com a necessidade de redução do número de regras, tal como se poderá explicar mais adiante.

Teremos assim como entradas do modelo de inferência difusa para o solar fotovoltaico, os seguintes parâmetros:



- Radiação Global;
- Latitude;
- Rendimento do painel em Standard Test Conditions;
- Área.

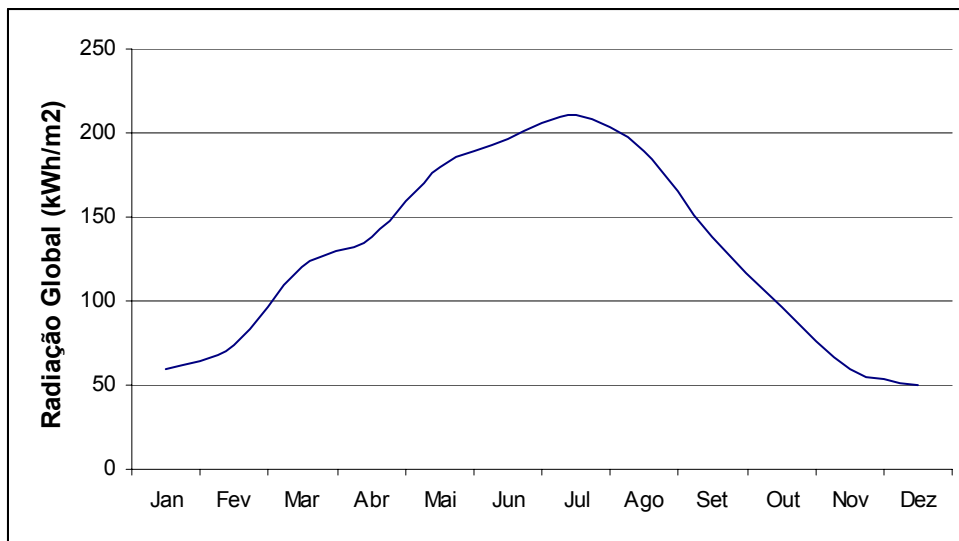
Existem assim no modelo factores de ordem natural (a Radiação Solar Global), associados à tecnologia (Rendimento do painel em Standard Test Conditions) e de localização (latitude) e caracterização (área) do local aonde a instalação solar fotovoltaica será instalada.

Os valores relativos à radiação global foram obtidos através da base de dados SODA (Solar Data Base). Para tal foram recolhidos valores de radiação global diária para vários pontos distribuídos ao longo de várias latitudes. Sempre que possível os valores recolhidos referiam-se a um período de 20 anos, respeitando assim as indicações mencionadas na secção 3.7 que referiam ser este o período indicado para a recolha de dados sobre a radiação global solar.

Relativamente ao  $\eta_{STC}$  os valores foram obtidos a partir de uma base de dados da Agência Internacional de Energia (AIE). Esta base de dados denominada “Performance Database” refere-se a um conjunto de instalações fotovoltaicas instaladas em vários pontos do mundo, entre os quais Portugal através da central fotovoltaica de Faro. Dela constam vários índices que permitem caracterizar o funcionamento das instalações fotovoltaicas, como a área ocupada pelo painel respectivo, a energia produzida, etc. Estes elementos também serão utilizados para a definição da gama de variações dos parâmetros de entrada.

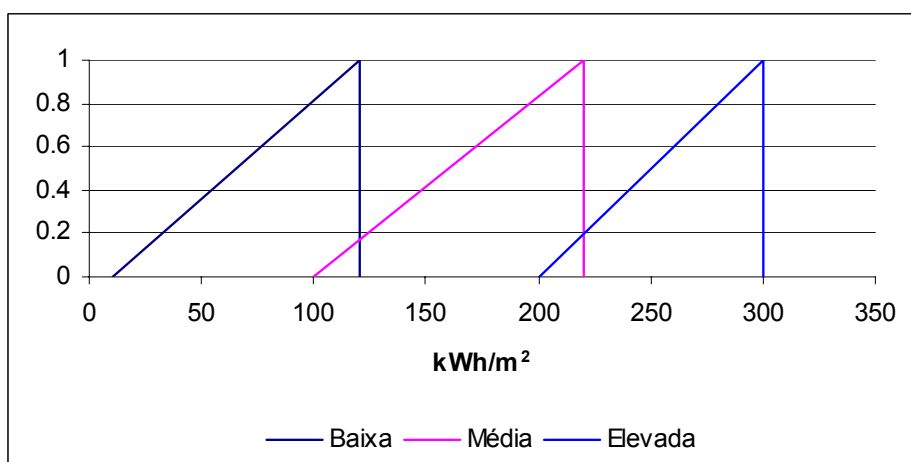
### **6.3.1 Fuzzificação das variáveis de entrada e saída**

Para a definição das variáveis linguísticas que irão definir a Radiação Solar Global foi necessário analisar os valores recolhidos na base de dados solar SODA. Os valores disponibilizados referem-se a valores diários, referentes sempre que possível a períodos de 20 anos, pelo que foi necessário calcular os valores mensais respectivos porque a entrada relativa a esta variável refere-se a valores mensais. Deste modo é possível observar o comportamento da radiação solar global ao longo de um ano, bem como das diferenças de valores em locais situados a latitudes diferentes. Na Figura 6-13 apresenta-se a evolução anual da Radiação Solar Global em Portugal para a latitude 41°.

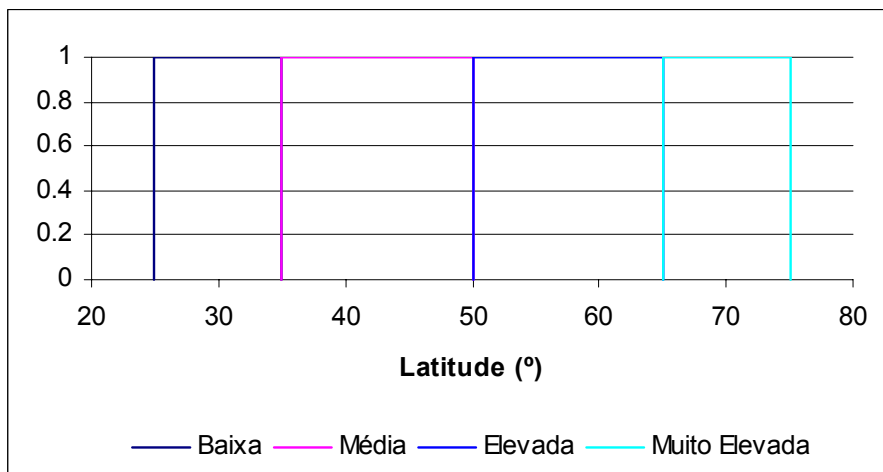
**Figura 6-13 - Variação da Radiação Solar Global**

Como se pode observar, os locais situados a esta latitude apresentam elevados níveis de radiação global, principalmente nos meses compreendidos entre Abril e Setembro correspondentes ao período da Primavera e Verão, o que revela um grande potencial de produção.

Analisando-se o conjunto de valores obtidos chegou-se à conclusão que, as gamas de variação da Radiação Global seriam representadas por três variáveis linguísticas ilustradas por conjuntos difusos triangulares referentes a “Baixa”, “Média” e “Elevada”. A gama de variação observada encontra-se definida pelos valores entre 5 e 300 kWh/m<sup>2</sup>/mês.

**Figura 6-14 - Representação fuzzy da Radiação Global Mensal**

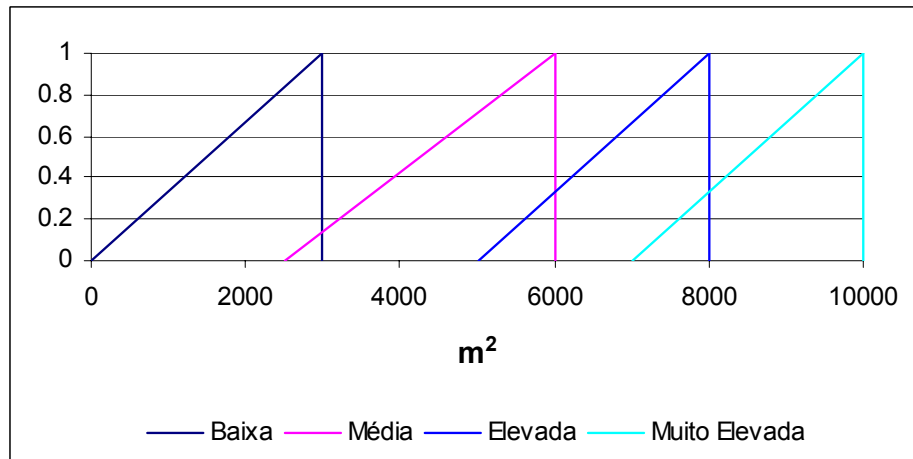
De referir, que para a latitude só se consideram valores entre os 25° e 75°, porque a base de dados SODA apenas tem valores de Radiação Global relativos a esta gama de latitudes. As variáveis linguísticas referentes à latitude encontram-se associadas a conjuntos difusos intervalares com a designação de “Baixa”, “Média”, “Elevada” e “Muito Elevada”, tal como se pode verificar na Figura 6-15.



**Figura 6-15 - Representação fuzzy da Latitude**

A opção assumida para a representação intervalar destas variáveis linguísticas com grau de pertinência 1, deve-se ao facto de não ser possível afirmar que uma dada instalação solar fotovoltaica será instalada no local A com a Latitude A, ou no local B com a Latitude B. Assim, qualquer local seleccionado na gama de variação definida para a Latitude terá o mesmo grau de pertinência.

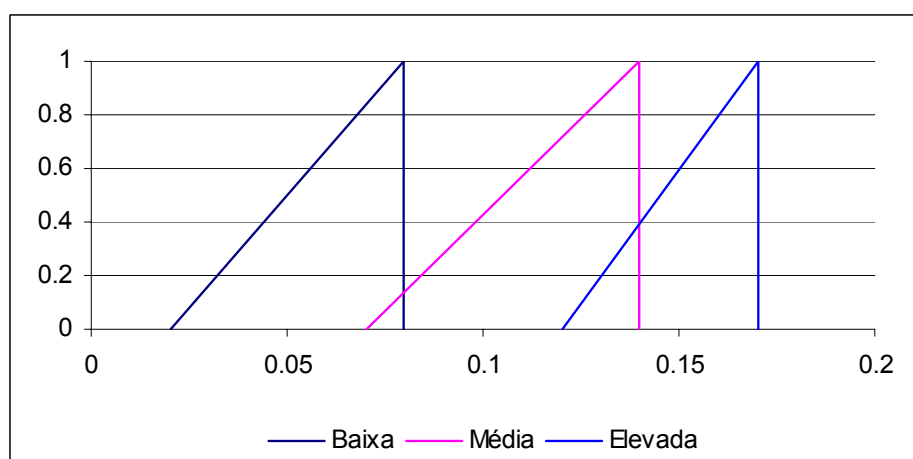
Quanto à área para a instalação solar fotovoltaica considerou-se que esta tem como limite superior 10000 m<sup>2</sup>. De referir, que poderia colocar-se a questão da área referir-se a área disponível ou à área efectiva do painel fotovoltaico. Neste caso, existe uma certa indiferença porque, o valor da área a introduzir no modelo refere-se apenas à área do painel que necessariamente terá de ser inferior à área disponível. Até porque, parte da área disponível terá de ser ocupada por equipamento auxiliar.



**Figura 6-16 - Representação fuzzy da Área**

Como se pode verificar na Figura 6-16 a Área é ocupada por quatro conjuntos difusos triangulares associados às variáveis linguísticas “Baixa”, “Média”, “Elevada” e “Muito Elevada”.

Tal como já foi referido anteriormente, os valores da variável de entrada Rendimento nas Condições Standard foram obtidos a partir de uma base de dados da Agência Internacional de Energia. Para tal, utilizou-se a expressão referida na secção 6.3, recolhendo os valores de potência das instalações e as áreas respectivas e de seguida procedeu-se ao seu cálculo. Assim, constatou-se que o rendimento varia entre os 2 e 14%, razão pela qual estes valores foram adoptados como limite desta variável de entrada.

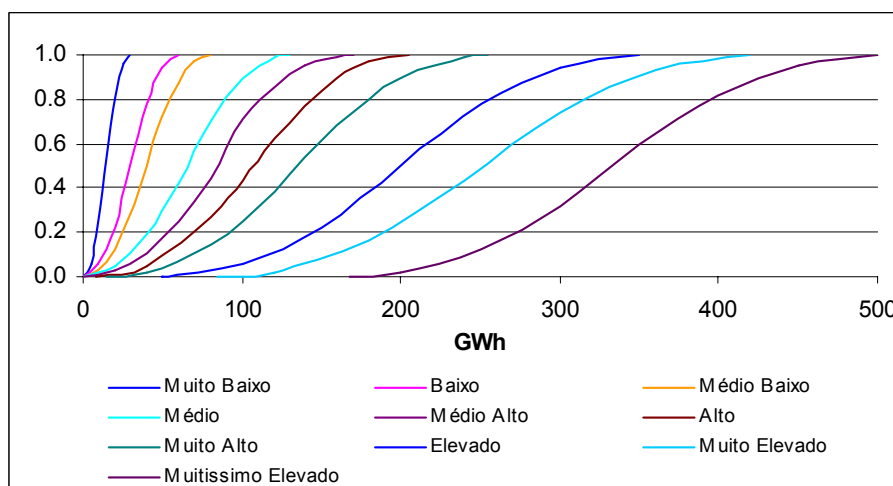


**Figura 6-17 - Representação difusa do Rendimento nas Condições Standard**

Como se pode verificar na Figura 6-17 esta variável de entrada será representada por três conjuntos difusos referentes a rendimentos “Baixo”, “Médio” e “Elevado”.

Mais uma vez, e tal como no modelo desenvolvido para as centrais eólicas, quando os conjuntos difusos adoptados foram de forma triangular, estes apresentam uma forma em “dente de serra”. As razões para tal opção são da mesma ordem às apontadas na secção 6.2.2.

No que respeita à saída do modelo de inferência difusa, esta será a Energia Produzida Mensalmente. A sua gama de variação estará dividida por dez classes.



**Figura 6-18 - Representação difusa da Energia Produzida Mensalmente**

De facto, a opção por dez conjuntos difusos para a representação da energia a produzir mensalmente, prende-se com o facto de se pretender obter uma maior sensibilidade da saída a variações dos valores das variáveis de entrada. Se a opção por um número de conjuntos difusos fosse menor, obter-se-ia uma menor distinção entre as saídas das várias regras, já que uma saída seria comum a um grande conjunto de regras. Deste modo, a sensibilidade às variações dos valores das variáveis de entrada seria muito menor e regras com valores bastante diferentes apresentariam um valor muito aproximado, o que seria um erro.

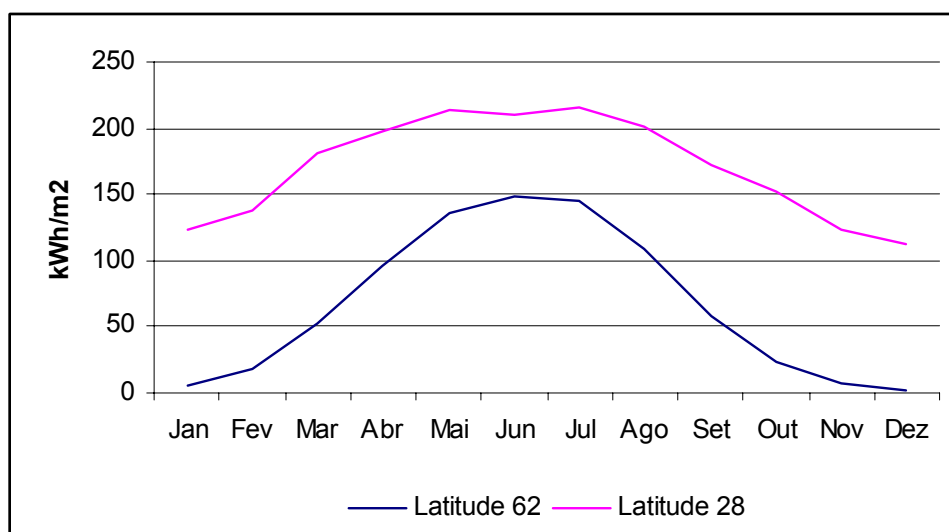
De referir, que houve uma preocupação em não considerar um grande número de variáveis linguísticas para cada uma das variáveis, visto que poderia obter-se uma quantidade elevada de regras.

### 6.3.2 Definição das regras

Neste modelo terão de se considerar os pressupostos assumidos na definição das regras no modelo de inferência difusa desenvolvido para sistemas eólicos, tal como consta na secção 6.2.3.

Assim, o número total de regras que se obteriam corresponde a 144. Tal valor é obtido pela combinação das diferentes variáveis linguísticas das variáveis de entrada. No entanto, existem uma série de regras que poderão ser eliminadas devido a incompatibilidades.

Assim, considerando por exemplo, um local situado numa latitude de 62° (Alta) terá uma radiação global Baixa. Logo, a regra que se obteria pela combinação de um local com uma latitude Alta com uma radiação global Elevada poderá ser ignorada. Semelhante raciocínio poderá ser efectuado para um local de latitude Baixa e uma radiação global Baixa. Mais uma vez, esta combinação de parâmetros de entrada será desprezada. Como se pode verificar pela Figura 6-19, a evolução da Radiação Global para dois locais com latitudes distintas, 28° e 62° respectivamente, apresenta uma diferenciação bem demarcada que permite confirmar os pressupostos assumidos para a eliminação de certas regras.



**Figura 6-19 - Evolução anual da Radiação Global**

Aplicando este raciocínio à totalidade das regras é possível eliminar uma série de regras, ficando no final com o total de 82 regras. Apresenta-se de seguida, alguns exemplos das regras obtidas:

Se a *Radiação Global Mensal* é **Baixa** e a *Latitude* é **Elevada** e a *Área* é **Baixa** e o *Rendimento* é **Baixo**, Então a *Energia Produzida Mensalmente* é **Muito Baixa**;

Se a *Radiação Global Mensal* é **Baixa** e a *Latitude* é **Elevada** e a *Área* é **Muito Elevada** e o *Rendimento* é **Baixo**, Então a *Energia Produzida Mensalmente* é **Baixa**;

Se a *Radiação Global Mensal* é **Média** e a *Latitude* é **Baixa** e a *Área* é **Elevada** e o *Rendimento* é **Baixo**, Então a *Energia Produzida Mensalmente* é **Média Baixa**;

Se a *Radiação Global Mensal* é **Elevada** e a *Latitude* é **Média** e a *Área* é **Elevada** e o *Rendimento* é **Elevado**, Então a *Energia Produzida Mensalmente* é **Muito Elevada**;

### 6.3.3 Desfuzzificação

Tal como no modelo de inferência difusa desenvolvido para sistemas eólicos, também neste caso a desfuzzificação a aplicar será o “Método do Menor dos Máximos” e pela mesma ordem de razões apontadas na secção 6.2.4.

### 6.3.4 Resultados

Para ilustrar os resultados obtidos apresentam-se dois exemplos de aplicação, relativos a diferentes locais.

Assim, considerando o exemplo da instalação de Miyakojima no Japão, verifica-se que o local onde está instalado este sistema solar fotovoltaico possui uma Radiação Global de 132 kWh/m<sup>2</sup>. A dimensão ocupada pelos painéis fotovoltaicos é de 6615 m<sup>2</sup> e calculando o rendimento deste sistema verifica-se que, este é de 7.8%. A latitude é de 24.4°.

Introduzindo estes valores no modelo de inferência difusa, obtém-se como saída um valor de 61.1 GWh, como produção mensal. Consultando a base de dados da AIE, a produção de energia correspondente a este sistema foi de 62.4 GWh, ou seja, o valor obtido pelo sistema de inferência difusa encontra-se muito próximo. Considerando agora uma situação de incerteza na Radiação Global, por exemplo considerando dois níveis de Radiação Global, um superior e outro inferior obter-se-ia os valores que se encontram na Tabela 6-5

Tabela 6-5 - Exemplo de incerteza na Radiação Global

Radiação Global (kWh/m <sup>2</sup> )		Latitude (°)		Rendimento STC (%)		Área (m <sup>2</sup> )		Energia (GWh)	
Valor	Variável Linguística	Valor	Variável Linguística	Valor	Variável Linguística	Valor	Variável Linguística	Valor	Variável Linguística
125	“Média”	24.4	“Baixa”	7.8%	“Baixa”	6615	“Elevada”	56.1	“Média Alta”
132	“Média”							61.1	“Média Alta”
150	“Média”							76.5	“Média Alta”

Neste caso, as variáveis linguísticas activadas pelos valores constantes da Figura 6-4 referem-se apenas a uma regra. No entanto, à medida que aumenta o valor da radiação solar global o valor da energia produzida aumenta de igual modo.

Como 2º exemplo de aplicação considera-se a instalação de Delphos, na Itália, a uma latitude de 41.3°, que possui uma dimensão de 3816 m<sup>2</sup>. A Radiação Global é de 133 kWh/m<sup>2</sup> e um Rendimento de 3.69%. Inserindo estes valores no modelo de inferência difusa obtém-se uma energia produzida de 25.5 GWh, quando consultando novamente a base de dados da AIE, o valor efectivamente obtido foi de 24.6 GWh.

## 6.4 Implementação do Modelo

Para a implementação destes modelos utilizou-se como ferramenta o Sistema de Inferência Difusa do MATLAB. Este sistema é dotado de uma interface gráfica que permite efectuar a introdução dos dados, referentes a gamas de variação e forma das variáveis de entrada, bem como da saída. Para além disso será necessário especificar o tipo de implicação a utilizar nas regras, o tipo de agregação a efectuar e qual será o processo de desfuzzificação seleccionado.

Relativamente à entrada de dados é necessário especificar o número de variáveis de entrada e de saída. De seguida, definisse a gama de variação de cada uma das variáveis e especificar o conjunto de variáveis linguísticas que as define, ou seja especificar a forma dos conjuntos difusos e seus valores, bem como a sua identificação. No caso dos nossos modelos a forma a atribuir aos conjuntos difusos é triangular e intervalar, pelo que será necessário indicar o



valor mínimo, médio e máximo para os conjuntos triangulares, e os valores máximos e mínimos para o conjunto intervalar. O sistema de inferência difusa apresenta várias opções para a forma dos conjuntos difusos a adoptar, sendo que as formas disponíveis são a triangular, rectangular, sigmoide, forma de S e gaussiana.

Depois de efectuado este procedimento é necessário proceder da mesma forma relativamente à saída. Desta vez, a forma dos conjuntos difusos que caracterizam as variáveis linguísticas da variável de saída terá a forma de S, ou seja terá uma forma ligeiramente achatada próximo dos valores mínimo e máximo, sendo praticamente linear nos valores intermédios.

De seguida, é necessário especificar qual o método a utilizar para os conectores “E” e “OU”, sendo que nos nossos modelos apenas são utilizados conectores “E”. Assim, existem como opções “Min” e “Prod”, em que a opção a seleccionar é “Min”.

Para a definição do método de implicação existem novamente duas opções “Min” e “Prod” respectivamente. O método a seleccionar será o “Min”.

Já no que respeita à agregação os métodos disponíveis são “Max”, “Sum” e “Probor”, sendo que o método a seleccionar é o “Max”.

Finalmente é necessário seleccionar o tipo de desfuzzificação. Como já foi referido no capítulo anterior, existem vários métodos possíveis de desfuzzificação, em que o sistema de inferência difusa do MATLAB disponibiliza os seguintes:

- Centróide (centroid);
- Bisector (bisector);
- Menor dos Máximos (som);
- Maior dos Máximos (lom);
- Média dos Máximos (mom).

O método de desfuzzificação a seleccionar será o “Menor dos Máximos”, como já foi referido anteriormente.

De seguida serão introduzidas as regras que definem o modelo de inferência difusa. As regras serão introduzidas através da interface gráfica tendo que definir qual a variável linguística que define cada uma das variáveis de entrada, bem como de saída. É necessário especificar o tipo de conector e o peso de cada regra. Neste caso, as regras terão todas o mesmo peso, ou seja 1.

Para a visualização dos resultados dos modelos deverá proceder-se da seguinte forma. Por exemplo, considerando o modelo eólico, no campo *input* da interface gráfica “*Rule Viewer*”

deverá especificar-se sucessivamente, e por esta ordem, os valores que definem as variáveis de entrada, ou seja “Velocidade do Vento”, “Fluxo de Potência”, “NEP” e “Área”. Cada valor introduzido irá activar o conjunto difuso referente à variável linguística respectiva, com um determinado grau de pertença. A composição das entradas activadas indicará qual a regra a ser disparada, e consequentemente qual o conjunto difuso a obter na saída. Este conjunto difuso será então desfuzzificado e assim obter-se-á um valor crespo que indica o valor da energia produzida mensalmente.

## **6.5 Conclusões**

Neste capítulo explicou-se o desenvolvimento dos modelos de inferência difusa para sistemas eólicos e solar fotovoltaico, de modo a determinar a produção de energia mensal tendo em consideração os vários tipos de incerteza inerentes a estas formas de energia. Foram tomados em consideração os elementos recolhidos no levantamento do Estado da Arte (Capítulo 3) relativamente a estas formas de produção de energia. Foi assim possível modelizar a incerteza inerente a estes sistemas, quer ao nível do recurso natural, quer ao nível da tecnologia.

Assim, inicialmente foram abordadas, quais as fontes de informação utilizadas para a caracterização ao nível do recurso e tecnologia e que factores foram tomados em consideração.

Abordaram-se quais as opções assumidas relativamente à partição do conjunto das variáveis de entrada e saída, quais as variáveis linguísticas assumidas e respectivos conjuntos difusos, sendo justificada a forma assumida para os mesmos e as suas gamas de variação.

De seguida, são justificados os pressupostos e simplificações assumidas nas definições das regras. Para tal foram observadas possíveis relações entre as variáveis de entrada de cada modelo e eliminadas possíveis regras incoerentes, ou que não correspondam a situações possíveis de ocorrer. O tipo de regras utilizado é do Mamdani, já que permitem uma maior interpretabilidade do que as do tipo Takagi-Sugeno.

Por fim, é descrito qual o tipo de desfuzzificação utilizado, que relembre-se foi o Método Menor dos Máximos, bem como as razões que levaram à adopção deste método.

Para cada modelo foram apresentados pequenos exemplos de aplicação, onde é possível observar a forma como os valores da saída variam quando se modificam as respectivas entradas.

Finalmente é apresentada uma descrição do suporte utilizado para o desenvolvimento dos modelos, ou seja o sistema de inferência difusa do MATLAB. É explicado de uma forma sucinta

a forma como deverão ser introduzidos os valores correspondentes às variáveis de entrada de cada modelo e a forma como se deverão obter os resultados.

## 7 Casos de Estudo

Neste capítulo apresentam-se dois casos de estudo, onde se aplicam os modelos desenvolvidos. Pretende-se efectuar uma análise de dois projectos de investimento, de duas centrais eólicas e uma outra fotovoltaica. Para cada instalação será efectuada uma análise com base nos pressupostos dos modelos desenvolvidos.

Como instrumentos auxiliares de análise, desenvolveram-se duas ferramentas em Excel, uma referente ao cálculo da remuneração a aplicar a qualquer central renovável e outra para determinação da viabilidade económica dos sistemas através do cálculo dos indicadores VAL e TIR. Para um melhor acompanhamento apresenta-se, em anexo uma descrição das várias parcelas que constituem o tarifário a aplicar a instalações de energia renovável tal como encontra-se definido em [67].

Os modelos desenvolvidos no capítulo 6 serão utilizados para determinar a produção de energia mensal para cada instalação, considerando a presença de incerteza em alguns dos parâmetros. É assim, possível realizar uma análise de sensibilidades e avaliar a viabilidade das instalações para cada caso.

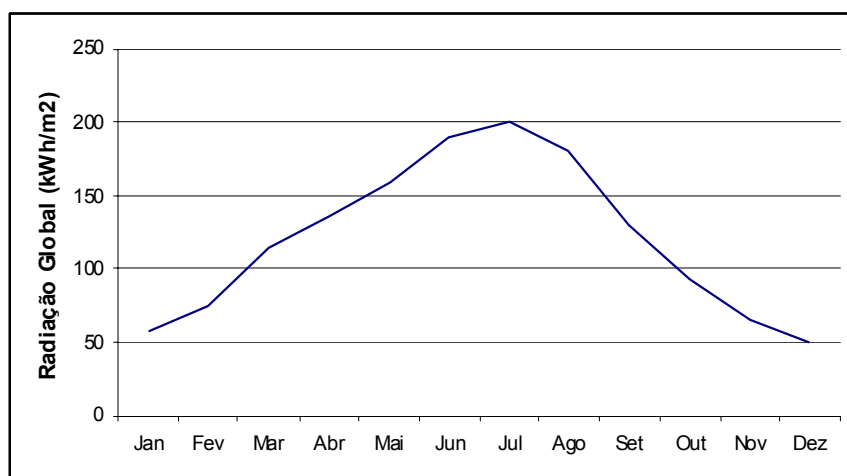
Foi elaborada uma folha de cálculo em Excel que permite calcular a remuneração das instalações de energia renovável, que será utilizada para calcular a remuneração a aplicar.

### 7.1 *Instalação Fotovoltaica*

A promoção da instalação solar fotovoltaica em análise corresponde a uma situação real e será sediada na zona de Lisboa e Vale do Tejo, e tem como objectivo a produção de energia para venda à rede eléctrica. Trata-se de um produtor consumidor uma vez que a potência instalada cifra-se em aproximadamente 1 MW. A potência prevista da instalação é de 1 MW necessitando de uma área disponível de cerca de 10000 m<sup>2</sup> (1 ha – valor típico para a instalação de 1 MW).

Para caracterizar o recurso natural, ao nível da radiação global, na zona de Lisboa e Vale do Tejo consultou-se o site SODA, de modo a recolher os valores necessários à sua caracterização. Assim, os valores recolhidos referem-se ao período compreendido entre 01/01/1993 e 31/12/2003, a que corresponde uma latitude de referente à localização da zona em

estudo. Com base nestes valores foram calculadas as médias da radiação global para cada mês, tendo-se obtido os valores que constam na seguinte figura.



**Figura 7-1 - Variação anual da radiação solar global**

Como se pode verificar a radiação global nesta zona apresenta uma variação compreendida entre os 50 e 201 kWh/m<sup>2</sup>, e um valor médio de 120 kWh/m<sup>2</sup>. Como seria de esperar os seus valores são inferiores durante os meses correspondentes às estações do Outono e Inverno, aumentando durante os meses da Primavera e Verão. No entanto, mesmo nos meses de radiação global inferior, esta apresenta valores relativamente razoáveis, o que indicia a sustentabilidade necessária para a implantação da central solar fotovoltaica.

Outro aspecto a ter em consideração diz respeito ao Rendimento nas Condições Standard a utilizar no modelo desenvolvido. Utilizando a expressão 6.3 chega-se à conclusão que o seu valor será de 10%.

### **7.1.1 Custos de Investimento**

Os valores típicos de investimento, mais recentes, associados a instalações solares fotovoltaicas, de acordo com [68], são os seguintes:

- Custo dos módulos incluindo o inversor 3,4 €/Wp;
- Ligação à rede [1,1 - 1,2] do valor por Wp instalado;
- Custos de operação e manutenção [1,5 - 2,5%] do valor total do investimento.

Os custos de investimento associados à instalação em consideração serão os seguintes:

**Tabela 7-1 - Custos associados a centrais fotovoltaicas**

Potência Instalada (kW)	Custos do Sistema		Investimento Inicial (M€)
	Módulos (€/Wp)	Ligação à rede	
1000	3.4	1.15	3.91

O investimento inicial, como se pode constatar, é de 3.91 M€.

Por sua vez os custos de manutenção e operação, considerando um valor médio de 2%, serão de 78200 €/ano.

### 7.1.2 Estimativa da produção mensal de energia eléctrica

Ao dispor de todos os elementos necessários à utilização do modelo de inferência difusa é possível estimar a energia produzida mensalmente, introduzindo os seguintes valores, tal como se ilustra na seguinte tabela:

**Tabela 7-2 - Estimativa da produção de energia**

Radiação Global (kWh/m <sup>2</sup> )		Latitude (°)		Rendimento STC (%)		Área (m <sup>2</sup> )		Energia (MWh)	
Valor	Variável Linguística	Valor	Variável Linguística	Valor	Variável Linguística	Valor	Variável Linguística	Valor	Variável Linguística
121	“Média”	39	“Média”	0.1	“Média”	10000	“Muito Elevada”	143	“Elevada”

### 7.1.3 Cálculo da remuneração a aplicar

Para o cálculo da remuneração a aplicar à instalação fotovoltaica utiliza-se a folha de cálculo referida anteriormente. Para um melhor acompanhamento apresentam-se os valores das diferentes parcelas que constituem a tarifa. Assim, para o KMHO e visto que a instalação será ligada à rede e toda a sua produção será única e exclusivamente para venda, o valor de KHMO a utilizar será de 1.25 visto que toda a produção será realizada nas horas de ponta e cheia (8:00 às

22:00 - horário de Inverno e 9:00 às 23:00 - horário de Verão). As restantes parcelas encontram-se na Tabela 3.

**Tabela 7-3 - Parcelas e valor total da remuneração da central fotovoltaica**

PF (€)	PV (€)	PA (€)	Z	IPC <sup>2</sup> <sub>m-1</sub>	IPC <sub>REF</sub>	LEV	VRD <sub>m</sub>
268	3,566	3,959	6.55	106.9	102.7	0.035	40,130

Como se verifica na tabela, o valor da remuneração é de 40,130 €.

#### 7.1.4 Análise à viabilidade do projecto

É considerado um empréstimo que representa 40% do valor do investimento, por um período de 20 anos a uma taxa de 7%.

De seguida, são calculadas as estimativas para o cash flow do investimento e ainda os indicadores associados ao valor actualizado líquido (VAL), considerando uma taxa de actualização de 3%, e à taxa interna de rentabilidade (TIR). O período de retorno considerado foi de 25 anos. Os valores calculados são apresentados na Tabela:

**Tabela 7-4 - Valores referentes à análise económica da central fotovoltaica**

VRD <sub>m</sub> (€)	Cash Flow (€)	VAL (€)	TIR (%)
40,130	230,897	391,402	2%

Como se pode verificar o projecto apresenta viabilidade financeira, já que o VAL é positivo.

#### 7.1.5 Análise de Sensibilidade

De seguida, considera-se uma gama de incerteza relativamente à Radiação Solar e avalia-se até ponto este factor tem impacto na viabilidade económica do projecto. Todos os restantes valores mantêm-se relativamente ao estudo inicial.

<sup>2</sup> Os valores de IPC<sub>m-1</sub> e IPC<sub>REF</sub> foram obtidos no INE – Instituto Nacional de Estatística

Assim, consideram-se como novos valores da Radiação Solar, correspondentes à variável linguística média, tal como ilustrado na Figura 6-14, ou seja 110 kWh/m<sup>2</sup> como valor inferior e 200 kWh/m<sup>2</sup> como valor máximo. Os valores de produção correspondentes são 112 MWh e 190 MWh respectivamente.

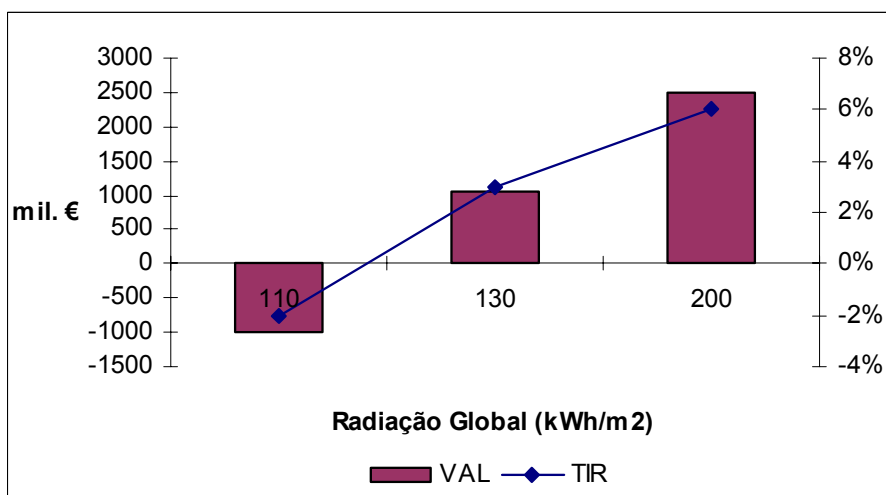
Na seguinte tabela, apresentam-se os valores referentes à remuneração, VAL e TIR, correspondentes à radiação solar média:

**Tabela 7-5 - Valores referentes à análise de sensibilidade da central fotovoltaica**

Radiação Solar (kWh/m <sup>2</sup> )	VRD <sub>m</sub> (€)	Cash Flow (€)	VAL (€)	TIR (%)
110	31,369	152,051	-981,544	-2
130	44,382	269,163	1,057,727	3
200	53,478	351,028	2,483,264	6

No caso, da Radiação Solar atingir um valor de 110 kWh/m<sup>2</sup>, o projecto deixará de ter qualquer tipo de viabilidade económica visto que o VAL e TIR não alcançam valores positivos.

Na seguinte figura é possível observar a variação do VAL e TIR com a Radiação Solar.



**Figura 7-2 - Evolução do VAL e TIR com a Radiação Global**

## 7.2 Instalação Eólica



O parque eólico em estudo encontra-se na zona norte interior do País. O regime de ventos desta zona apresenta uma velocidade média compreendida entre 3.5 e 8 m/s. Apesar dos valores referidos não serem particularmente elevados, nada invalida que a central eólica a implantar não possa ser viável economicamente, sendo o objectivo deste estudo avaliar essa situação. Para além da velocidade do vento, terão que ser analisados os outros factores que permitem caracterizar o local onde o parque será instalado, como o fluxo de potência e o NEP. Nesta zona os valores variam entre 0.5 e 6 MW/ha e os 50 e 270 horas respectivamente. Atendendo às restrições impostas pelas características do terreno e restrições ambientais a área disponível para a implantação do parque é de 50 ha.

### **7.2.1 Custos de Investimento**

Os custos associados a este tipo de instalações, de acordo com [69], são os seguintes:

- custos de investimento: 770 – 1000 €/kW
- custos de operação e manutenção: 1.5 – 3.5% dos custos de investimento.

Para o cálculo do investimento considera-se um valor de 900 €/kW e para os custos de operação e manutenção um valor de 2.5% dos custos de investimento.

Os custos de investimento são ainda relativamente elevados, mas espera-se que diminuam de um forma significativa durante os próximos anos. As projecções constantes em [69] apontam que para 2010 os custos de investimento variem entre 600 e 800 €/kW.

### **7.2.2 Estimativa da produção mensal de energia eléctrica**

Utilizando o sistema de inferência difusa desenvolvido para as instalações eólicas é possível determinar a produção mensal respectiva. Perante os valores definidos na caracterização do recurso eólico na zona onde o parque eólico vai ser instalado, assume-se que os valores das variáveis de entrada do modelo serão os seguintes:

- Velocidade média do vento: 6.5 m/s;
- Fluxo de Potência: 3.5 MW/ha;

- NEP: 190 h;
- Área: 50 ha

Estes valores afiguram-se razoáveis porque, correspondem a valores médios das gamas definidas pelo que obter-se-á uma ordem de grandeza da produção do parque para um cenário médio de disponibilidade do recurso eólico.

Introduzindo estes valores obtém-se uma energia mensal produzida de 32.3 GWh. A seguinte tabela ilustra a aplicação do modelo eólico:

**Tabela 7-6 - Estimativa da produção do parque eólico**

Velocidade média do vento (m/s)		Fluxo de Potência (MW/ha)		NEP (horas)		Área (ha)		Energia (GWh)	
Valor	Variável Linguística	Valor	Variável Linguística	Valor	Variável Linguística	Valor	Variável Linguística	Valor	Variável Linguística
6.5	“Baixa”	3.5	“Baixa”	190	“Média”	50	“Baixa”	32.3	“Baixa”

De forma a determinar a potência do parque divide-se o valor da energia produzida pelo NEP, obtendo assim um valor de 170 MW.

### 7.2.3 Cálculo da remuneração a aplicar

Recorrendo novamente à folha de cálculo, determina-se o valor da tarifa a aplicar a instalações eólicas. Para um melhor acompanhamento apresenta-se os valores das diferentes parcelas que constituem a tarifa. Deste modo, para o KMHO será necessário considerar a produção nas horas de ponta e cheia, bem como nas horas de vazio. Visto que, como não se dispõe da evolução da produção do parque ao longo do dia, considera-se que 60% da produção é realizada nas horas de cheia e ponta, e o restante nas horas de vazio. Assim, o valor obtido para o KMHO foi de 1.01.

O valor das restantes parcelas encontram-se na seguinte tabela:

**Tabela 7-7 - Parcelas e valor total da remuneração do parque eólico**

PF (€)	PV (€)	PA (€)	Z	IPC <sub>m-1</sub>	IPC <sub>REF</sub>	LEV	VRD <sub>m</sub>
80,453	804,270	893,387.	1.64	106.9	102.7	0.015	2,508,059

Como se pode verificar o valor da remuneração será de 2.51 M€.

#### 7.2.4 Análise à viabilidade do projecto

Os terrenos onde os parques eólicos são instalados são da posse das Câmaras Municipais ou de particulares, os promotores vêem-se na contingência de pagar uma renda anual. Isto obriga a que se tenha de considerar este aspecto na análise da viabilidade. Assim, o valor considerado para a renda anual é de 150000 € por ano.

Por outro lado, considera-se a existência de um empréstimo que corresponde a 50% do valor do investimento, sujeito a uma taxa de 7% durante um período de 20 anos.

Tendo em consideração que a potência do parque eólico é de 170 MW os valores referentes ao investimento e custos de operação e manutenção, de acordo com os valores definidos na secção 7.2.1, serão de 153 M€ e 3.8 M€ respectivamente.

De seguida, são calculadas as estimativas para o cash flow do investimento e ainda os indicadores associados ao valor actualizado líquido (VAL), considerando uma taxa de actualização de 4%, e à taxa interna de rentabilidade (TIR). O período de retorno considerado foi novamente de 20 anos. Os valores calculados são apresentados na Tabela:

**Tabela 7-8 - Valores referentes à análise económica do parque eólico**

VRD <sub>m</sub> (€)	Cash Flow (€)	VAL (€)	TIR (%)
2,508,059	17,171,143	80,361,444	9

Como se pode verificar o investimento é viável porque, o VAL é um valor positivo, bem como a TIR.

#### 7.2.5 Análise de Sensibilidade

De seguida, considera-se uma gama de incerteza relativamente à velocidade do vento e avalia-se até ponto este factor tem impacto na viabilidade económica do projecto. Assim, considera-se uma diminuição do valor da velocidade média, no local em consideração, para um valor de 5 m/s. Todos os restantes valores mantêm-se relativamente ao estudo inicial.

**Tabela 7-9 - Valores referentes à análise de sensibilidade do parque eólico**

<b>Velocidade média do vento (m/s)</b>	<b>VRD<sub>m</sub> (€)</b>	<b>Cash Flow (€)</b>	<b>VAL (€)</b>	<b>TIR (%)</b>
5	2,283,843	15,153,206	52,937,009	8%

Como se pode verificar pela análise da tabela a viabilidade do investimento neste parque eólico não se encontra em causa, apesar da diminuição da velocidade do vento, já que a TIR apresenta um valor positivo.

Outra forma, de considerar incerteza quanto à disponibilidade do vento consiste na variação do NEP. Assim, considera-se uma gama de incerteza relativamente ao NEP, através da sua variação no intervalo definido entre as 160 e 220 horas, e avalia-se até ponto este factor tem impacto na viabilidade económica do projecto. O intervalo definido corresponde a uma variação “Média” do NEP, tal como definido em 6.2.2. Os restantes valores mantêm-se relativamente ao estudo inicial e utilizando o modelo de inferência difusa desenvolvido obtém-se os seguintes valores:

**Tabela 7-10 - Valores referentes à análise de sensibilidade do parque eólico**

<b>NEP (h)</b>	<b>VRD<sub>m</sub> (€)</b>	<b>Cash Flow (€)</b>	<b>VAL (€)</b>	<b>TIR (%)</b>
160	1,544,993	8,503,555	-37,433,904	1
220	3,312,181	24,408,244	178,716,008	15

Como se pode verificar pela análise da tabela a viabilidade do investimento neste parque eólico não se encontra em causa, apesar da variação do NEP, já que as diferentes TIR são positivas. No entanto, se se verificar uma diminuição do valor de NEP abaixo de 160 horas, a viabilidade financeira do parque está em causa, já que com um NEP de 160 horas, o VAL tem um valor negativo e portanto inviabilizando o projecto.

### 7.2.6 Parque off-shore

Considerando a exploração da possibilidade de instalar parques eólicos *off-shore* ao largo da nossa costa, poderá utilizar-se o modelo de inferência difusa para avaliar a sua potencial produção e correspondente viabilidade de investimento. A implantação deste tipo de parques não poderá efectuar-se em qualquer lugar, havendo a necessidade de identificar os locais com uma menor profundidade, menor incidência de correntes marítimas e avaliar a sua distância à costa.

Na costa a velocidade média do vento será, em geral, mais elevada que a velocidade equivalente *on-shore* o que implica que os valores de fluxo de potência e NEP também serão elevados. No entanto, não existe actualmente, porque não há registos de medições, qualquer informação relativamente aos valores dos vários parâmetros definidos no modelo desenvolvido. Assim, neste estudo avaliar-se-á a produção previsível considerando gamas de variação dos parâmetros conjugadas com a experiência dos peritos. Como hipótese, e de acordo com o exposto anteriormente relativamente aos valores que as variáveis de entrada deverão assumir, considera-se razoável que a velocidade média do vento assuma valores entre 7.5 e 12 m/s, o fluxo de potência terá um valor compreendido entre 6 e 8 MW/ha e o NEP terá um valor entre 200 e 320 horas/mês. Estas gamas de variação correspondem a valores elevados relativamente às gamas de variação definidas para cada uma das respectivas variáveis de entrada, que poderão ser consultadas na secção 6.2.2. Para a área considerar-se-ão várias hipóteses, ou seja, valores de 30, 70 e 95 ha que correspondem a valores definidos nos conjuntos difusos “Baixa”, “Média” e “Elevada” respectivamente. Considera-se que não faz sentido considerar áreas mais elevadas atendendo à irregularidade da costa portuguesa.

Deste modo, a tabela seguinte ilustra os valores de produção obtidos através do modelo eólico de inferência difusa, para as várias hipóteses consideradas.

Tabela 7-11 - Estimativa da produção para um parque eólico off-shore

Velocidade média do vento (m/s)		Fluxo de Potência (MW/ha)		NEP (h)		Área (ha)		Energia Produzida (GWh)	
Valor	Variável Linguística	Valor	Variável Linguística	Valor	Variável Linguística	Valor	Variável Linguística	Valor	Variável Linguística
7.5	“Média”	6	“Média”	200	“Média”	30	“Baixa”	39.3	“Média Baixa”
12	“Elevada”	8	“Elevada”	320	“Elevada”			73.6	“Média Alta”
8.5	“Média”	6	“Média”	200	“Média”	70	“Média”	63.8	“Média Alta”
12	“Elevada”	8	“Elevada”	320	“Elevada”			152	“Muito Alta”
8.5	“Média”	6	“Média”	200	“Média”	95	“Elevado”	93.1	“Alta”
12	“Elevada”	8	“Elevada”	320	“Elevada”			211	“Elevada”

Para a avaliação de investimento, há que ter em consideração, o facto dos custos associados a parques *off-shore* serem mais elevados. Assim, segundo [69] os custos de investimento, para parques *off-shore* situados entre 10 e 30 km da costa, estão compreendidos entre 1170 e 2000 €/kW e os custos de operação e manutenção correspondem a 2 – 3.5% dos custos de investimento. No entanto, de acordo com a mesma fonte, as previsões apontam para que em 2010 os custos de investimento estejam compreendidos entre 1000 – 1300 €/kW. Assim, considerando o grande desenvolvimento tecnológico a que se tem assistido nesta área, para o estudo de viabilidade económica considera-se um custo de investimento de 1300 €/kW e uma percentagem de 3% para os custos de operação e manutenção.

No estudo da avaliação da viabilidade económica deste projecto, considerar-se-ão as piores condições, ou seja, os valores inferiores da velocidade média do vento, fluxo de potência e NEP, em conjunto com cada um dos valores da área, tal como definido na Tabela 7-11. Os valores do cash-flow, VAL e TIR, calculados de acordo com os pressupostos já assumidos anteriormente nas secções 7.2.3 e 7.2.4, são os seguintes:

Tabela 7-12 - Viabilidade económica de um parque off-shore

Energia Produzida (GWh)	VRD <sub>m</sub> (€)	Cash Flow (€)	VAL (€)	TIR (%)
39.3	3,017,121	17,983,243	7,998,144	4
63.8	4,898,023	29,301,628	15,418,685	4
93.1	7,147,429	42,787,006	22,289,377	4

Como se pode verificar, para estas condições, a viabilidade de um parque off-shore não se encontraria em risco, já que os valores do VAL são positivos.

### **7.3 Conclusões**

Este capítulo serviu para ilustrar a aplicação dos modelos desenvolvidos na análise da viabilidade económica de centrais eólicas, uma on-shore e outra off-shore, e uma central fotovoltaica. Os modelos numa fase inicial foram utilizados para determinar a produção, mediante certas condições definidas de acordo com o potencial do recurso natural em cada situação.

Os pressupostos assumidos para os investimentos e custos de operação e manutenção, referem-se para todos os casos a um cenário intermédio.

De seguida, procedeu-se à análise da viabilidade económica dos projectos depois de calculada remuneração de cada uma das centrais, tal como se encontra definida em [67]. É calculado o valor do cash-flow, VAL e TIR, em cada uma das situações e retiradas as devidas conclusões. Em ambos os casos a viabilidade económica dos projectos não se encontra em causa, já que o TIR é positivo.

Para cada caso, foi efectuada uma análise de sensibilidades para observar a forma como a viabilidade dos projectos se alterariam em função da variação de um dos parâmetros de entrada. No caso, da central fotovoltaica o parâmetro a alterar foi a Radiação Solar, tendo-se introduzido um valor superior ( $150 \text{ kWh/m}^2$ ) e outro inferior ( $110 \text{ kWh/m}^2$ ) ao inicialmente definido ( $121 \text{ kWh/m}^2$ ). Assim, verifica-se que a viabilidade do projecto só é colocada em causa se se verificar o valor inferior, já que o valor do VAL é negativo.

No que diz respeito à central eólica on-shore, o parâmetro de entrada a alterar foi a velocidade média do vento, tendo-se diminuído o seu valor e observado qual o impacto na viabilidade do projecto. Deste modo, verificou-se que o projecto continua a ser válido, apesar de se assistir a uma diminuição do recurso natural. No entanto, para este caso foi efectuada outro estudo alterando o NEP, o que constitui outra forma de considerar incerteza no recurso natural, ou seja a sua maior ou menor disponibilidade. Mais uma vez, foram considerados dois novos valores, um superior e outro inferior ao valor inicialmente definido, e verifica-se que quando o valor do NEP é de 160 h, o projecto é inviável.

Para a central *off-shore* consideraram-se gamas de variação possíveis para a velocidade do vento, fluxo de potência e NEP, sendo depois utilizados com diferentes áreas. Pretendeu-se

assim avaliar a produção para cada situação, utilizando para tal o modelo desenvolvido. De seguida, foi avaliada a viabilidade económica de central *off-shore* para as piores condições definidas, tendo-se verificado que a mesma não se encontra em causa em nenhuma situação.

Foi assim ilustrada a aplicação dos modelos desenvolvidos a estes casos de estudo, que neste caso passaram pela avaliação económica de centrais eólicas ou fotovoltaicas.



## 8 Conclusões

Nesta tese foram desenvolvidos modelos, com base em sistemas de inferência difusa, de modo a incluir explicitamente a incerteza associada aos elementos para análise de projectos de investimento de produção de energia com base nos recursos naturais. A aplicação da metodologia versou a determinação da produção de energia recorrendo a sistemas eólicos e solares fotovoltaicas. A utilização de sistemas de inferência difusa permitiu considerar de forma explícita a incerteza associada a este tipo de produção.

No Capítulo 1 efectuou-se uma introdução ao corpo desta tese. De seguida, apresenta-se no Capítulo 2 um enquadramento da situação da utilização das energias renováveis em Portugal e na União Europeia, bem como a justificação sobre o interesse do trabalho aqui desenvolvido. Foi assim caracterizada a situação nacional ao nível da potência instalada e consumo de energias renováveis em Portugal, bem como os objectivos assumidos ao nível de penetração desta forma de produção e instrumentos de apoio à sua implantação. Referiu-se o interesse das energias renováveis nos objectivos definidos na Estratégia Nacional de Desenvolvimento Sustentável (ENDS) e no Plano Nacional de Alterações Climáticas (PNAC). É destacado o papel ao nível ambiental, porque permitirá a Portugal atingir os compromissos internacionais assumidos no que se refere às emissões de gases de efeito de estufa e diminuir o consumo de combustíveis fósseis. Ao nível económico permitirá melhorar a balança comercial, já que reduzirá, por um lado, a importação de combustíveis fósseis, por outro lado, a necessidade de aquisição de licenças de CO<sub>2</sub> devido à produção com tecnologias na sua maioria não poluidoras e permitirá um melhor posicionamento internacional de certificados de origem, pela aposta nas tecnologias com capacidade de obtenção desses títulos e participação no mercado internacional de PRE pelo desenvolvimento em Portugal de experiência relevante na área. Por outro lado, as energias renováveis apresentam-se como motores de desenvolvimento económico pelo grande dinamismo em termos de investimento e desenvolvimento de competências nacionais, com a consequente criação de emprego. De referir ainda que, uma crescente utilização das energias renováveis contribui para a diversificação da oferta de electricidade e assim, contribuindo para o reforço das redes eléctricas, diminuindo o risco de falhas de abastecimento. Com o objectivo de contribuir positivamente no sentido de fornecer ferramentas de análise surge o trabalho desenvolvido nesta tese.

No Capítulo 3 caracterizou-se o estado da arte relativamente a várias tecnologias de produção de energia, nomeadamente a eólica, a solar fotovoltaica e térmica, e a biomassa. Descreveram-se os seus princípios de funcionamento e os respectivos componentes de cada sistema. No que diz respeito à energia eólica e à solar fotovoltaica efectuou-se, para além do levantamento relativamente à tecnologia, um estudo mais aprofundado sobre a forma de modelização dos respectivos recursos naturais tendo em conta o seu carácter incerto, e consequentemente sobre o seu potencial de produção. Concluiu-se que a produção eólica tem como factores de influência as características do local onde o parque vai ser instalado, nomeadamente no que diz respeito à orografia e presença de obstáculos, o tipo de turbinas a instalar, a respectiva disposição no parque e obviamente o recurso natural. É assim necessário caracterizar o vento através de campanhas de recolhas de medidas da sua velocidade. No entanto, quando os valores recolhidos não se referem à altura a que as pás da turbina se encontrarão é necessário efectuar a respectiva transposição, de acordo com os métodos referenciados. Normalmente, a forma de representação mais comum da velocidade do vento é efectuada recorrendo a distribuições de Weibull. A modelização da produção poderá ser realizada através de modelos de fiabilidade e através de processos de Markov. Foi também referenciada a modelização de sistemas diesel, quando associados a sistemas eólicos, sendo esta efectuada também recorrendo a processos de Markov. No entanto este factor não foi modelizado constituindo um dos trabalhos a desenvolver com vista à avaliação do potencial de produção com sistemas híbridos.

Para os sistemas solares fotovoltaicos determinaram-se os factores de influência da sua produção, como sejam o tipo de células fotovoltaicas utilizadas e os rendimentos dos seus componentes (inversores, reguladores, baterias). Constatou-se que os dados da radiação solar, para a caracterização do respectivo potencial, deverão referir-se sempre que possível a períodos de 20 anos, de forma a englobar de uma forma mais completa possível todos os factores que a influenciam, como a presença de poluição, a humidade relativa do ar e temperatura. A localização é outro factor que influencia os valores de radiação, já que à medida que a latitude aumenta, a radiação solar diminui. Foram também identificadas formas de obtenção dos valores da radiação solar através de métodos estocásticos, de regressão linear e de análise de séries temporais. Estes métodos revelam-se importantes quando se pretende avaliar o potencial solar para um dado local, em que não se possuam de medidas para a sua caracterização. Quanto à produção de energia foram referenciadas várias expressões que permitem efectuar o seu cálculo. Este capítulo revela-se importante porque permite identificar os aspectos relevantes à

modelização a efectuar e justifica as opções assumidas mais tarde no fazer o levantamento sobre as bases relativas a conjuntos difusos e a sistemas de inferência difusa. No Capítulo 4 definiu-se conjuntos difusos e efectuou-se a sua distinção relativamente a outras formas de representação da incerteza, nomeadamente com base estatística como a distribuição de probabilidades. Apresentaram-se as suas principais propriedades e quais as operações básicas em que poderão ser empregues, bem como quais as formas que os conjuntos difusos poderão assumir. Introduziram-se conceitos inerentes à lógica difusa como, o conceito de regras difusas e as suas propriedades, o raciocínio aproximado e o conceito de variáveis linguísticas, que servirão de classificação aos conjuntos difusos a definir no Capítulo 6.

Relativamente ao Capítulo 5, descreveu-se a estrutura de sistemas de inferência difusa, ou seja, definiu-se fuzzificação, a base de dados, a base de regras, o tipo de máquinas de inferência que se podem definir e desfuzzificação. Para cada um destes conceitos foram apontados quais os cuidados a ter e quais as propriedades que deverão respeitar.

No Capítulo 6 foram justificadas as opções assumidas para a modelização, através de sistemas de inferência difusa, de sistemas eólicos e solares fotovoltaicos. Para tal, foram tomadas em consideração as conclusões obtidas no levantamento do Estado da Arte, relativamente a factores de influência e fontes de incerteza que terão impacto na produção de energia neste tipo de instalações. Assim, consideraram-se como entradas do modelo eólico a velocidade média do vento, o fluxo de potência, o número de horas equivalentes à produção nominal e a área, enquanto que para o modelo solar fotovoltaico as entradas referem-se à radiação solar, latitude, rendimento às condições standard e a área. de uma forma geral, os conjuntos difusos adoptados para as diferentes variáveis linguísticas que definem cada uma das entradas é a triangular, porque são as de mais fácil interpretação. Para a saída, a energia produzida, a forma dos conjuntos difusos adoptada é a forma de S. As regras adoptadas foram do tipo Mamdani, já que estas permitem uma maior interpretabilidade do que as do tipo Takagi-Sugeno. O método adoptado para a desfuzzificação foi o Menor dos Máximos, de acordo com as razões apontadas oportunamente. Para ilustrar a aplicação dos modelos, foram apresentados dois pequenos exemplos de aplicação que servem para ilustrar a consideração de incerteza nas variáveis de entrada e assim avaliar o seu impacto.

Por fim, no Capítulo 7 apresentaram-se dois casos de estudo, que consistem na avaliação de investimento de centrais, duas eólicas (uma on-shore e outra off-shore) e uma fotovoltaica. Deste modo, para os casos da central eólica on-shore e fotovoltaica, foram inicialmente considerados os dados que permitem caracterizar os locais de implantação e de seguida

determinado a produção de energia respectiva, sendo então avaliada a viabilidade económica do projecto. De seguida, considerou-se a presença de incerteza ao nível do recurso natural e avaliou-se qual o seu impacto na viabilidade do projecto. No caso da instalação fotovoltaica verifica-se que existe um nível de radiação solar que tem de se verificar, caso contrário o projecto não tem viabilidade económica. No caso, do parque eólico, para os valores considerados no estudo efectuado, verifica-se que a viabilidade económica só é colocada em causa, quando o valor de NEP for de 160 horas. Para a central off-shore considerou-se incerteza nas várias entradas, já que não existem valores que permitam caracterizar este tipo de instalações em Portugal, e determinou-se a produção que se obteria. De seguida, para as piores condições definidas avaliou-se a viabilidade económica deste tipo de instalações.

Fica assim ilustrada uma das aplicações dos modelos desenvolvidos, ou seja, a utilização por parte de investidores em energias renováveis, de modo a servirem de instrumento auxiliar à determinação da viabilidade económica dos seus projectos. Com estes modelos é possível efectuar essa avaliação considerando assim vários cenários ao nível do recurso ou tecnologia, bem como relativamente à área disponível para a implantação das centrais eólicas ou fotovoltaicas.

As Agências de Energia também poderão utilizar estes modelos, para avaliação do potencial em locais que se encontrem dentro da sua área de influência, e assim sensibilizar as autoridades locais para este tipo de produção, bem como das vantagens que daí poderão obter.

Como futuro trabalho a desenvolver, destaca-se a extensão dos modelos a outras formas de produção renovável, nomeadamente à biomassa já que esta se afigura como sendo uma das fontes de energia renovável com maior crescimento ao longo dos próximos anos. É assim importante estudar formas de modelização da sua produção, podendo os sistemas de inferência difusa constituir uma das possibilidades. Outra área a desenvolver consiste na modelização de sistemas híbridos, sejam eles associados ou não a sistemas diesel. Neste caso, está-se perante sistemas de menor dimensão, com um objectivo de fornecer energia eléctrica a locais afastados dos centros de consumo. Também aqui, os sistemas de inferência difusa poderão ajudar a modelizar a incerteza subjacente a este tipo de produção.

## Referências

- [1]. DGGE, *Evolução do consumo de energia*. [www.dgge.pt](http://www.dgge.pt), 2004.
- [2]. DGGE, *Evolução da produção de energia*. [www.dgge.pt](http://www.dgge.pt), 2004.
- [3]. Ministério da Economia, *Regulamento de Execução da Medida de Apoio ao Aproveitamento do Potencial Energético e Racionalização de Consumos (MAPE)*. Diário da República, 2002. **Portaria nº 383/2002, de 10 de Abril**.
- [4]. Ministério da Economia, *Resolução do Conselho de Ministros n.º 63/2003*. Diário da República, 2003. **DR nº 98, I Série-B de 28-04-2003**.
- [5]. Comissão Europeia, *Energia para o futuro: fontes de energia renováveis - Livro Branco para uma Estratégia e um Plano de Acção Comunitários*. JO, 1998. **C 210**.
- [6]. Instituto do Ambiente, *Plano Nacional para as Alterações Climáticas*. 2003.
- [7]. Ordenamento do Território e Ambiente Ministério das Cidades, *Estratégia Nacional de Desenvolvimento Sustentável - Versão para discussão pública*. 2002.
- [8]. Mário Pinto Isabel Almeida Mota, Jorge Vasconcellos e Sá, Viriato Soromenho Marques, José Félix Ribeiro, *ESTRATÉGIA NACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL ENDS: 2005-2015*. 2004.
- [9]. Parlamento Europeu e do Conselho, *Directiva 2001/77/CE relativa à promoção da electricidade produzida a partir de fontes de energia renováveis no mercado interno de electricidade*. Jornal Oficial da União Europeia, Setembro de 2001.
- [10]. Parlamento Europeu e do Conselho, *Decisão n.º 1230/2003/CE que aprova o programa plurianual de acções no domínio da energia: Programa "Energia Inteligente - Europa" (2003-2006)*. Jornal Oficial da União Europeia, Junho de 2003.
- [11]. COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES, *COM(2004) 366 - The share of renewable energy in the EU*. May 2004.
- [12]. dos Transportes e do Ambiente CEEETA - Centro de Estudos em Economia de Energia, *Energia Eólica*. [www.ceeeta.pt/RIERA/e-olica.htm](http://www.ceeeta.pt/RIERA/e-olica.htm), 1998.
- [13]. Rui Castro, *Introdução à Energia Eólica*. Instituto Superior Técnico, 2004.
- [14]. Danish Wind Power Association, *The Guided Tour*. [www.windpower.org](http://www.windpower.org), 2003.
- [15]. D. Mayer, G. Kariniotakis. *An advanced on-line wind resource prediction system for the optimal management of wind parks*. in *Third Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution, and Energy Conversion (Med Power)*, 4-6 Nov. 2002. 2002. Athens, Greece: Nat. Tech. Univ. Athens.
- [16]. B.H. Bailey. *Siting and output prediction for wind energy project planning*. in *Proceedings of Winter Meeting of the Power Engineering Society*, 27-31 Jan. 2002. 2002. New York, NY, USA: IEEE.
- [17]. Riad B. Chedid, Sami H. Karaki, Rania Ramadan, *Probabilistic production costing of diesel-wind energy conversion systems*. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2000. **15**(3): p. 284-289.
- [18]. V. Guruprasasa, Rau Suresh, H. Jangamshetti, *Site Matching of Wind Turbine Generators: A Case Study*, in *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 1999. p. 1537-1543.
- [19]. M.A.R. Rodriguez Garcia, J.R. Ubeda, *Reliability and production assessment of wind energy production connected to the electric network supply*. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1999. **146**(2): p. 169 - 175.
- [20]. International Energy Agency, *IEA Photovoltaic Power Systems Programme*. <http://www.iea-pvps.org/>, 2003.
- [21]. BP Solar, *Site da BP Solar*. <http://www.bpsolar.com/>.

- [22]. Shell Solar, *Site da Shell Solar*.  
<http://www.shell.com/home/Framework?siteId=shellsolar>.
- [23]. IEA - Task III, *Lead Acid Battery Guide for Stand Alone Photovoltaic Systems*. 1999.
- [24]. J. Roger, D. Spiers, *Guidelines for the use of batteries in photovoltaic systems*. Canadian Energy Diversification Research Laboratory of CANMET & Neste Oy, Finland, 1998.
- [25]. BP Solar, *Inverters: Sine Wave*. 2002.
- [26]. Speciality Concepts Inc., *Photovoltaic Charge Controller*. 2001.
- [27]. BP Solar, *Charge Regulators*. 2002.
- [28]. Dennis Anderson, Jay Mariyappan, *SOLAR THERMAL THEMATIC REVIEW*. The Global Environment Facility, 2001.
- [29]. Portal das Energias Renováveis, *Energia Solar*. [www.energiasrenovaveis.com](http://www.energiasrenovaveis.com), 2002.
- [30]. R. Alfayo and C.B.S. Uiso, *Global solar radiation distribution and available solar energy potential in Tanzania*. Physica Scripta Volume T  
3rd Conference on Physics and Industrial Development, 4-7 Sept. 2000, 2002. **T97**: p. 91-8.
- [31]. N. EL-Nashar, S. A. Al-Awadhi, *Stochastic modelling of global solar radiation measured in the state of Kuwait*. Environmetrics, 2002. **13**: p. 751-758.
- [32]. A. Zeroual, M. Ankrim, and A.J. Wilkinson, *Stochastic modelling of daily global solar radiation measured in Marrakesh, Morocco*. Renewable Energy, 1995. **6**(7): p. 787-793.
- [33]. Akram A. Zuhairy, and A.A.M. Sayigh, *Simulation and modeling of solar radiation in Saudi Arabia*. Renewable Energy, 1995. **6**(2): p. 107-118.
- [34]. Husamettin Bulut, *Generation of typical solar radiation data for Istanbul, Turkey*. International Journal of Energy Research, 2003. **27**(9): p. 847-855.
- [35]. A.N. Celik, *The system performance of autonomous photovoltaic-wind hybrid energy systems using synthetically generated weather data*. Renewable Energy, 2002. **27**(1): p. 107-121.
- [36]. A. Rabl, M. Collares Pereira, *The Average Distribution of Solar Radiation Correlations Between Diffuse and Hemispherical and Between Daily and Hourly Insolation Values*. Solar Energy, 1979. **22**: p. 155-164.
- [37]. Cláudio Domingos Martins Monteiro, *Integração de Energias Renováveis na Produção Descentralizada de Electricidade Utilizando SIG*. FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO, 1996.
- [38]. Rui M. G. Castro, *Energias Renováveis e Produção Descentralizada - Introdução à Energia Fotovoltaica*. Instituto Superior Técnico, 2004.
- [39]. S. M. Shaahid, M. A. Elhadidy, *Parametric Study of Hybrid Power Generating Systems*. Renewable Energy, 2000. **21**: p. 129 - 139.
- [40]. International Energy Agency, *Educational Web site on Biomass and Bioenergy*.  
[www.aboutbioenergy.info](http://www.aboutbioenergy.info), 2003.
- [41]. Parlamento do Europeu e do Conselho, *DIRECTIVA 2003/30/CE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 8 de Maio de 2003 relativa à promoção da utilização de biocombustíveis ou de outros combustíveis renováveis nos transportes*. JO - L, 2003. **123**: p. 42 - 46.
- [42]. Lofti Zadeh, *Fuzzy sets*. Information and Control, 1965. **8**: p. 338-353.
- [43]. Paulo Sergio da Silva Borges, *A model of strategy games based on the paradigm of the Iterated Prisoner's Dilemma employing Fuzzy Sets*. Universidade Federal de Santa Catarina, 1996.
- [44]. A. Kaufmann, *Introduction to the theory of fuzzy subsets*. New York: Academic Press, 1975.
- [45]. H. J. Zimmermann, *Fuzzy sets theory and its applications*. Kluwer - Nijhoff, 1985.

- [46]. A. Kandel, *Fuzzy mathematical techniques with applications*. Addison - Wesley, 1986.
- [47]. H. Prade, D. Dubois, *Fuzzy sets and systems: theory and applications*. Academic Press, 1980.
- [48]. Donald H. Sanders, *Statistics: A Fresh Approach*. McGraw-Hill International Editions, 1990.
- [49]. Lofti Zadeh, *The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning*. Informations Sciences, 1975. **9**: p. 43 - 80.
- [50]. R. R. Yager, *A characterization of the extension principle*. Fuzzy sets and systems, 1986. **18**: p. 205 - 217.
- [51]. Bo Yuan, George J. Klir, *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications*. 1995.
- [52]. R. Giles, *Lukasiewicz logic and fuzzy theory*. International Journal Man-Machine Studies, 1976. **8**: p. 317 - 327.
- [53]. L. Kohout, W. Bandler, *Fuzzy power sets and fuzzy implication methods*. Fuzzy sets and systems, 1980. **4**: p. 13 - 30.
- [54]. M. Sugeno, *Industrial applications on fuzzy control*. North-Holland, 1985.
- [55]. T. Yasukawa M. Sugeno, *A fuzzy logic based approach to qualitative modeling*. IEEE TRAnsactions on Fuzzy Systems. **1**(1): p. 7 - 31.
- [56]. J. T. Ross, *Fuzzy logic with engineering applications*. McGraw-Hill, 1995.
- [57]. Lofti Zadeh, *A Fuzzy Set Theoretical Interpretation of Hedges*. Journal of Cybernetics, 1973. **2**: p. 4 - 34.
- [58]. Maria Teresa Ponce de Leão, *Planeamento de redes de distribuição com produção independente*. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Electrotécnica e Computadores - FEUP, 1995.
- [59]. S. Assilian, E. H. Mamdani, *An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller*. International Journal Man-Machine Studies, 1975. **7**: p. 1 - 13.
- [60]. C. Lee, *Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller - Part I*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1990. **20**(2).
- [61]. M. Ryan, J. Yan, J. Power, *Using Fuzzy Logic*. Prentice Hall, 1994.
- [62]. Li-Xin Wang, *A Course in Fuzzy Systems and Control*. Prentice Hall, 1997.
- [63]. T. J. Ross, *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. McGraw-Hill, 1995.
- [64]. E. H. Mamdani, *Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic systems*. IEEE Transactions on Computers, 1977. **26**: p. 1182 - 1191.
- [65]. M. Sugeno, T. Takagi, *Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1985. **15**: p. 116 - 132.
- [66]. Ravesh Govind, Renhong Zhao, *Defuzzification of fuzzy intervals*. Fuzzy sets and systems, 1991. **43**(1): p. 45 - 55.
- [67]. Ministério da Economia, *Decreto-Lei n.º 339-C/2001*. Diário da República, 2001. **DR 300 - 29/12/2001, Série I - A**.
- [68]. ESTIR, *Scientific and Technological References, Energy Technology Indicators: Photovoltaics Technologies*. 2002.
- [69]. ESTIR, *Scientific and Technological References, Energy Technology Indicators: Wind Energy Technologies*. 2002.

**ANEXO**



## Tarifário

Em grande medida, o tarifário a aplicar às instalações de energia renovável é comum, diferindo apenas na parcela referente à parcela ambiental. Esta parcela é afectada de um factor Z, que está dependente da tecnologia em causa.

Deste modo, de acordo com a legislação vigente, a remuneração concedida à centrais renováveis rege-se pela fórmula que se apresenta na expressão (7.1).  $VDR_m$  representa a remuneração, no mês m, da central renovável.

$$VRD_m = KMHO_m \times [PF(VRD_m) + PV(VRD_m) + PA(VRD_m) \times Z] \times \frac{IPC_{m-1}}{IPC_{ref}} \times \frac{1}{1 - LEV}$$

Para maior clarificação da forma de remuneração apresenta-se uma descrição de todas as variáveis envolvidas na expressão de cálculo de  $VRD_m$ .

### *Factor Modulação - KMHO*

$KMHO_m$ : Factor de modulação do diagrama de cargas, no ponto de injeção e no mês m. É calculado pela seguinte expressão. Este factor reflecte o impacto da produção no diagrama de cargas do SEP.

$$KMHO_m = \frac{KMHO_{PC} \times E_{PC} + KMHO_V \times E_V}{E}$$

$KMHO_{PC}$ : factor de modulação no período das horas cheias (8:00 às 22:00 - horário de Inverno) e 9:00 às 23:00 - horário de Verão) que assume o valor de 1.25.

$KMHO_V$ : factor de modulação no período das horas de vazio, restantes 10 horas. Este factor assume o valor 0,65.

$E_{PC}$ : energia entregue à rede no período das horas cheias

$E_V$ : energia entregue à rede no período das horas de vazio

$E$ : energia total entregue à rede

*Parcela Fixa – PF*

A expressão seguinte apresenta a forma de cálculo da parcela fixa da remuneração.

$$PF(VRD_m) = PF(U_{ref}) \times COEF_{pot,m} \times POT_{med,m}$$

PF(VRD<sub>m</sub>): calculada mensalmente, destina-se a remunerar os custos evitados no SEP pelo facto de haver uma potência proporcionada pela central que se vai reflectir na redução dos custos de investimento.

PF (U<sub>ref</sub>): corresponde à parcela que representa os custos evitados no SEP. Segundo o DL168/99 esta parcela assume o valor 5,44c€/kWh. Os custos evitados referem-se às reduções de custos de investimento de que o SEP beneficia pelo facto de ter mais um valor de potência instalada.

$$COEF_{pot,m} = ECR_m / (576 \times P_{decl})$$

ECR<sub>m</sub>: energia produzida pela central renovável no mês m.

P<sub>decl</sub>: potência declarada pelo promotor no acto do licenciamento, expressa em kW.

*Parcela Variável – PV*

A expressão apresenta a forma de cálculo da parcela variável da remuneração.

$$PV(VRD_m) = PV(U_{ref}) \times ECR_m$$

PV (U<sub>ref</sub>): representa a redução dos custos de operação e manutenção das redes. Segundo o DL168/99 esta parcela assume o valor 2,49c€/kWh.

*Parcela Ambiental – PA*

A expressão apresenta a forma de cálculo da parcela ambiental da remuneração.

$$PA(VRD_m) = ECE(U_{ref}) \times CCR_{ref} \times ECR_m$$

$ECE(U_{ref})$ : valor unitário de referência para as emissões de CO<sub>2</sub> evitadas pela central renovável

$CCR_{ref}$ : montante unitário das emissões de CO<sub>2</sub> da central de referência. Assume o valor 370g/kWh.

*Factor tecnologia – Z*

Z: assume o valor 6,55 no caso das centrais fotovoltaicas, com potência instalada superior a 5 kW.

No caso dos parques eólicos, o factor Z está dependente do número de horas de produção. Os valores poderão ser os que constam da seguinte tabela:

**Tabela 1 - Valores de Z para centrais eólicas**

<b>Horas de funcionamento (h)</b>	<b>Factor Z</b>
$h \leq 2000$	1.7
$2000 < h \leq 2200$	1.3
$2200 < h \leq 2400$	0.95
$2400 < h \leq 2600$	0.65
$h > 2600$	0.4

*Factor de perdas*  $k_p = 1/(1-LEV)$

LEV: assume o valor 0,015 para potências instaladas superiores a 5 MW

*Correcção tendo em vista a inflação*

$IPC_{m-1}$ : índice de preço no consumidor, sem habitação, no mês m-1

$IPC_{ref}$ : índice de preço no consumidor, sem habitação, no mês de referência, Dezembro de 1998

Foi elaborada uma folha de cálculo em Excel que permite calcular a remuneração das instalações de energia renovável, que será utilizada para calcular a remuneração a aplicar.